

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CAMPUS ARARANGUÁ**

**MATHEUS VERCKA NOVAK**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE ENERGIA**

**ARARANGUÁ**

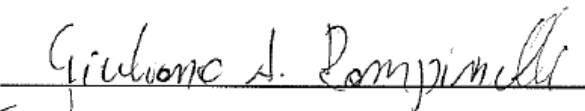
**2016**


**MATHEUS VERCKA NOVAK**

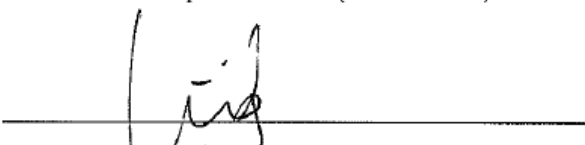
**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE ENERGIA**

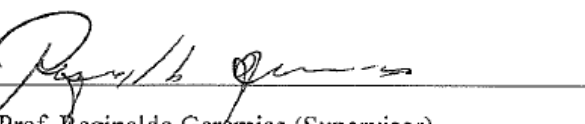
Trabalho de conclusão de curso na modalidade de artigo científico para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II do curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Araranguá

Aprovado em: 11/07/2016

  
Prof. Giuliano Arns Rampinelli (Orientador)

  
Prof. Luciano Lopes Pftischer (Examinador)

  
Prof. Mauricio Girardi (Examinador)

  
Prof. Reginaldo Gexemias (Supervisor)

# **ANÁLISE DE MODELOS MATEMÁTICOS DE TEMPERATURA DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS E AVALIAÇÃO ENERGÉTICA A PARTIR DE DADOS DA CASA SOLAR EFICIENTE**

**Matheus Vercka Novak\***

## **RESUMO**

*A intensa busca pela modernidade e pela produção de energia vem ocasionando uma série de mudanças em nosso comportamento e, principalmente, no meio ambiente. Junto a isso, tem-se visto um grande desenvolvimento das tecnologias ditas renováveis em nosso cotidiano, como a inserção de sistemas fotovoltaicos e plantas eólicas, por exemplo. A tecnologia fotovoltaica, tema deste trabalho, não é uma descoberta recente, porém os estudos vêm se intensificando nas últimas décadas, o que permitiu a redução do preço de fabricação dos módulos fotovoltaicos e sua consequente inserção no mercado mundial. O Objetivo deste trabalho é analisar os dados energéticos disponibilizados através do Sistema de Aquisição de Dados (SAD) da Casa Solar Eficiente – RJ, e compará-los a modelos matemáticos para previsão da temperatura de operação dos arranjos fotovoltaicos que alimentam a residência através de cálculos e de simulações feitas com o auxílio de softwares para analisar o seu comportamento durante o ano de 2014. Os resultados mostram que o sistema está produzindo pouco abaixo do esperado devido ao envelhecimento dos módulos operantes há aproximadamente 19 anos e por possíveis erros do sistema de aquisição de dados. Também observou-se que todos os modelos matemáticos utilizados para estimar a temperatura de operação dos módulos neste trabalho seguem a mesma tendência do comportamento registrado através das medições de temperatura no próprio módulo, porém com um desvio pouco abaixo dos registros do estudo de caso.*

Palavras-chave: Energia Solar, Módulos Fotovoltaicos, Casa Solar Eficiente.

## **1. INTRODUÇÃO**

Neste capítulo inicial apresenta-se um pouco da história e da trajetória da energia solar fotovoltaica no cenário mundial, bem como as vantagens e a evolução política e financeira referente a sua inserção no mercado de geração de eletricidade.

---

\*Graduando do Curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, Rodovia Governador Jorge Lacerda, 3201, Jardim das Avenidas Araranguá, Santa Catarina, Brasil, CEP 88900-000. E-mail: matheus\_vercka@hotmail.com

## 1.1 Inserção da energia fotovoltaica na matriz nacional

Desde o final da revolução industrial, algumas pessoas perceberam que a energia se tornaria um setor independente e autônomo, e que desempenharia importante papel de regulação da nova economia mundial (MIRANDA, 2013).

Especificamente entre o período de 2006 a 2011, a utilização das energias renováveis aumentou consideravelmente sua taxa no mercado com um crescimento rápido e sustentado, concretizando-se como uma alternativa cada vez mais confiável e presente nas residências, empresas e prédios públicos (ONUDI, 2015).

O Brasil possui um imenso potencial para geração de energia elétrica a partir de energias renováveis complementares devido a sua localização geográfica privilegiada. A Figura 1 apresenta uma média dos índices de Irradiação global anual em kWh/m<sup>2</sup> entre o período de 1986 a 2005. Através dele é possível perceber que o Brasil encontra-se entre os mais bem posicionados geograficamente (FEITOSA, 2016).

A irradiação média anual no Brasil varia entre 1.200 e 2.400 KWh/m<sup>2</sup>/ano, valores significativamente superiores à maioria dos países europeus que destacam-se com grande utilização de sistemas fotovoltaicos, cujas estatísticas indicam intervalos entre 900 e 1.250 kWh/m<sup>2</sup>/ano na Alemanha e 1.200 e 1.850 kWh/m<sup>2</sup>/ano na Espanha, por exemplo. (NOTA TÉCNICA, 2012). Países como Austrália e EUA (Califórnia) apresentam níveis ainda superiores aos nacionais.

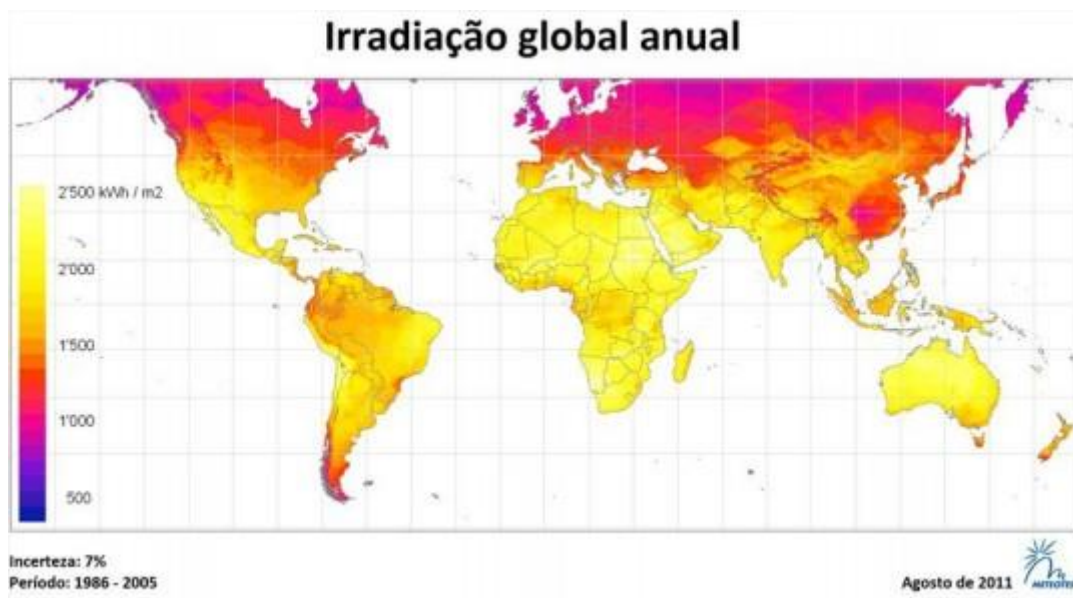


Figura 1 - Irradiação global anual (Adaptado de METEONORM, 2012)

O principal desafio apresentado pela geração renovável é a sua intermitência, ou seja, a dependência direta dos recursos renováveis, como o sol e o vento, por exemplo, que não estão disponíveis 24h por dia. Esta é uma característica comum das fontes renováveis, ocorrendo assim a necessidade de uma maior preparação da rede elétrica e do SIN (Sistema Interligado Nacional), de modo que essa oscilação de potência e de energia fornecida durante o período intermitente, seja alimentada de imediato. Diante dessa falta de garantia quanto ao fornecimento ao sistema elétrico, cria-se a necessidade de certo planejamento para esse suprimento através de outras fontes de geração (SOARES et al, 2010).

Sendo assim, os aspectos tecnológicos são considerados determinantes para o sucesso da difusão da energia solar, e conhecer detalhadamente o recurso renovável motriz é peça chave para seu aproveitamento eficiente.

As fontes convencionais de energia atualmente apresentam um excelente nível competitivo em função do conhecimento, capacitação e tecnologia desenvolvida. Entretanto, a valorização da sustentabilidade nos dias atuais, somada a questões ambientais e segurança energética, transformam as energias provindas de fontes renováveis em um cenário propício para descentralização e para a diversificação da matriz nacional (FEITOSA, 2016).

A participação da energia solar no sistema elétrico brasileiro ainda é muito pequena, cerca de 0,02%, sendo que a energia nuclear, representada somente pelas Usinas de Angra 1 e Angra 2 é 70 vezes maior (1,4% da capacidade instalada), uma contradição diante do enorme potencial solar apresentado anteriormente (ABSOLAR, 2016). Segundo a Associação de Energia Solar Fotovoltaica, a expectativa do setor é que a energia solar atinja 4% da participação no SIN até o ano de 2024.

Projeta-se que o setor de geração de energia solar vai receber investimentos da ordem de R\$ 12,5 bilhões até 2018 na construção de 99 projetos contratados em leilões entre 2013 e 2015, de acordo com a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. A entidade também espera que sejam contratados outros dois mil MW de projetos de energia solar fotovoltaica nos dois leilões de energia de reserva previstos para este ano (2016), em julho e outubro (POLITO, 2016).

Os sistemas fotovoltaicos podem ser implantados em qualquer localidade que apresente níveis de irradiação solar suficientes. Estes sistemas não utilizam nenhum combustível, não possuem partes móveis e requerem baixos níveis de manutenção. Durante a operação, não produzem ruído acústico ou eletromagnético e também não

emitem gases tóxicos (SOUZA, 2015). Ou seja, além de possuírem uma rápida instalação, acarretam em impactos ambientais menos rigorosos comparados à outras fontes convencionais.

Outra vantagem destes sistemas é a capacidade de ampliação em etapas do conjunto gerador. Por exemplo, o dono de uma unidade consumidora possui montante para instalar somente módulos fotovoltaicos com potência suficiente para suprir somente 50% de seu consumo energético mensal total. Mais tarde, este mesmo consumidor poderá ampliar sua capacidade de geração, inserindo novos módulos conforme situação financeira até tornar-se autossuficiente (RIBEIRO, 2016).

O desenvolvimento do mercado solar também traz reflexos quanto à geração de empregos. Projeta-se para os próximos anos um aumento na geração de empregos neste setor através da chegada de fábricas produtoras de módulos no país. Os sistemas fotovoltaicos não são compostos apenas por usinas e sim, por sistemas isolados, que necessitam de mão de obra distribuída em todo o território (RIBEIRO, 2016).

Até meados do século XX, a tecnologia fotovoltaica em nível mundial era utilizada majoritariamente em sistemas isolados, diferindo do cenário atual, onde cerca de 95% dos sistemas fotovoltaicos são conectados à rede elétrica (SFCR). Este grande crescimento foi fruto de programas governamentais de incentivo ao uso da tecnologia fotovoltaica, promovidos por países como Alemanha, Austrália, China, Espanha, EUA, entre outros. Os preços dos sistemas fotovoltaicos apresentaram uma considerável redução conforme a capacidade instalada aumentava (NOTA TÉCNICA DEA 19/14, 2014). A Figura 2 apresenta a queda abrupta dos preços dos sistemas fotovoltaicos instalados na Alemanha com o desenvolvimento dos incentivos governamentais.



Figura 2 – Evolução dos preços dos sistemas fotovoltaicos na Alemanha (MIRANDA, 2013)

Atualmente, as condições para o desenvolvimento da energia solar fotovoltaica estão tornando-se cada vez mais favoráveis, visto que a mesma apresenta uma trajetória de custos decrescentes ano após ano e, ao mesmo tempo, a energia elétrica gerada pelas fontes convencionais apresenta trajetória inversa de custos crescentes.

Um grande incentivo internacional aprovado recentemente que revolucionará o mercado fotovoltaico mundial, foi aprovado na cidade de São Francisco, na Califórnia (EUA). A Câmara Municipal da cidade de São Francisco determinou que todo novo edifício residencial ou comercial de até dez andares precisará instalar painéis solares para aquecimento de água ou geração de energia. Essa nova Lei substitui a medida anterior que exigia uma área de 15% do telhado de prédios de pequeno a médio porte. Esta nova exigência entra em vigor a partir de janeiro de 2017 e de acordo com o presidente da Associação Brasileira de Refrigeração, Ar-condicionado, Ventilação e Aquecimento (Abrava), em breve a entidade estará encaminhando um projeto semelhante ao governo do Estado de São Paulo (BRASIL ENERGIA, 2016).

Através do avanço tecnológico tornou-se possível a redução dos preços e também o desenvolvimento desta fonte que decorre da confluência de alguns fatores, como maturidade tecnológica dos componentes do sistema provindos de diversas experiências, unida ao crescimento da capacidade global de fabricação e também aos programas de fomento utilizados em alguns países europeus como citados anteriormente (ONUDI, 2015).

Diante deste cenário, torna-se inevitável o aumento da participação do recurso solar junto a matriz mundial. Além de ser desejável em função dos inúmeros benefícios

apresentados, dentre os quais destacam-se a redução da emissão dos gases de efeito estufa, como a permanência de povoados e a redução de impactos junto a fauna e flora para construção de hidrelétricas e usinas térmicas.

Devido ao aumento dos custos com a energia elétrica que, somente em 2015 no Brasil, registraram um acréscimo de mais de 51%, consumidores tem ampliado a busca por novas alternativas buscando reduzir o valor das faturas de energia elétrica no país. Assim, mesmo com a anunciada alteração da cor das Bandeiras Tarifárias (vermelho para verde), a geração distribuída, por meio da tecnologia fotovoltaica começa a atrair olhares de investidores e consumidores (RIBEIRO, 2016).

A atratividade econômica da micro e minigeração estão intrinsecamente relacionadas às tarifas da energia elétrica convencional, já que seu benefício, do ponto de vista financeiro, é o custo evitado com a compra de energia elétrica convencional.

Políticas regulatórias têm sido homologadas constantemente mundo afora, visando-se sempre impulsionar os empreendimentos de geração de energia elétrica renovável, incentivando o crescimento e diversificação da matriz elétrica, principalmente neste momento em que temas como mudança climática, redução da dependência de insumos energéticos fósseis, segurança energética e crescimento socioeconômico sustentável adquirem maior importância (FEITOSA, 2016).

O acordo assinado pelo governo brasileiro na Conferência Mundial sobre Clima (COP-21), determina que a matriz energética do país terá 23% da sua participação baseada nas fontes solar, eólica e de biomassa até 2030 é mais um exemplo do desenvolvimento das fontes renováveis e sua consequente expansão no setor energético (ABSOLAR, 2016).

Desta forma, visando contribuir para os estudos referentes a eficiência energética e para a qualidade de geração, este trabalho propõe realizar uma análise através de simulações e cálculos de índices de mérito técnico do desempenho do sistema fotovoltaico instalado na Casa Solar Eficiente que será apresentada no próximo capítulo.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

Neste capítulo serão abordados os conceitos da energia solar, geração distribuída e sua contextualização no setor elétrico brasileiro, bem como a descrição dos índices de mérito técnico que irão servir como base para a realização da análise energética do sistema instalado na Casa Solar Eficiente.



## 2.1. Potencial solar

O Sol é a estrela mais próxima da Terra e emite uma enorme quantidade de radiação por segundo. A energia é gerada no núcleo solar predominantemente através das reações de fusão dos núcleos dos átomos de hidrogênio em átomos de hélio. Nestas reações, devido à conversão de matéria, uma quantidade gigantesca de energia é liberada. Apenas uma pequena parcela dessa energia chega à Terra devido à grande distância existente. Saber qual é a natureza deste recurso, bem como sua disponibilidade constitui o primeiro passo para o aproveitamento eficiente deste recurso que possui uma grande disponibilidade de maneira gratuita (ONUDI, 2015).

Segundo dados disponíveis nos mapas do projeto SWERA (Solar and Wind Energy Resource Assessment), a região no entorno do campus Curitiba-PR da UTFPR, recebe ao longo do ano uma irradiação global horizontal média de 4,619kWh/m<sup>2</sup> por dia, enquanto cidades brasileiras mais próximas da linha do Equador, apresentam valores próximos aos 6,5kWh/m<sup>2</sup> por dia. Desta forma, percebe-se que o Brasil, mesmo nas regiões menos favorecidas de radiação solar, apresenta uma média acima da grande maioria dos países referência em energia solar fotovoltaica (FUSANO, 2013). A Figura 4 apresenta os níveis de radiação média diária no país, divididos por regiões, elaborados no ano de 2006.

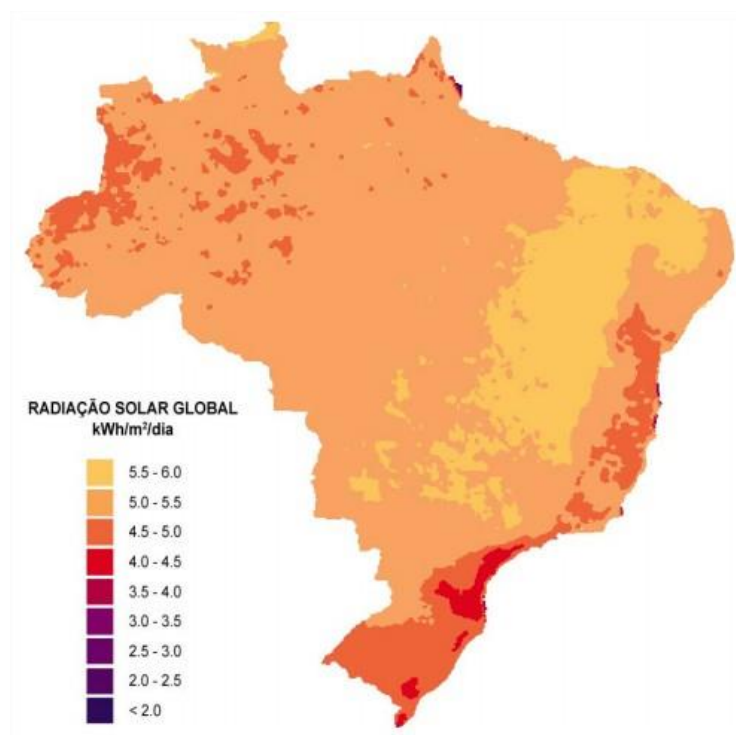


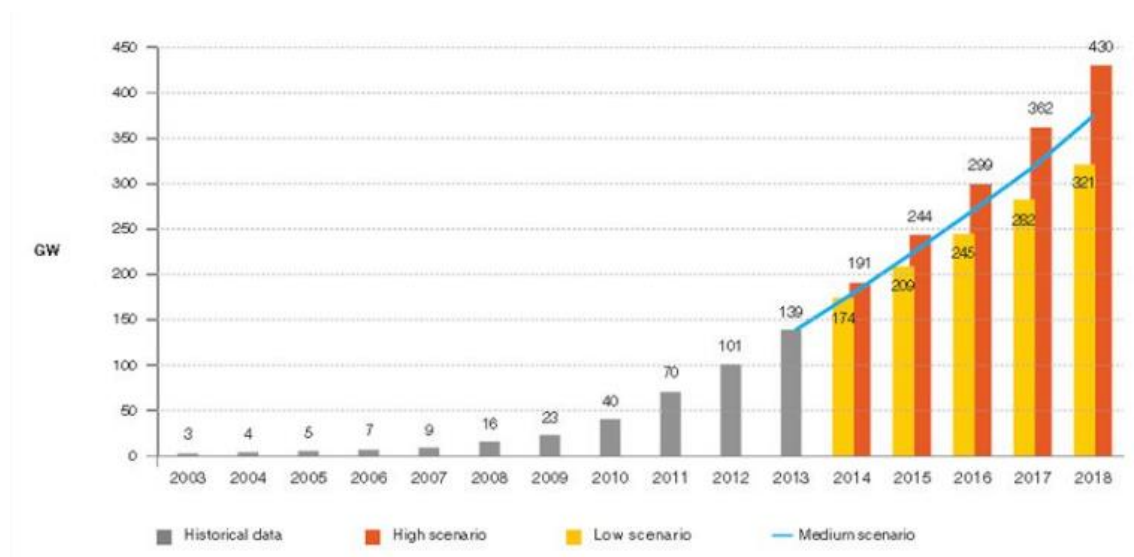
Figura 3 –Média Anual da Radiação Solar Global no Brasil (MARTINS et al, 2005).

De maneira geral, os níveis de irradiância global são relativamente bem distribuídos pelas regiões do país. A região nordeste apresenta os maiores valores de irradiação solar global, com maior média e menor variabilidade anual entre as regiões geográficas (NOTA TÉCNICA, 2012).

A Figura 5 apresenta a evolução da capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos no mundo, formando uma curva exponencial de crescimento que tende a continuar evoluindo durante os próximos anos.

Mesmo com todo o recente avanço, o potencial da energia solar ainda é subutilizado. Segundo a ABSOLAR, a energia solar no Brasil tem um potencial de geração maior que a soma do potencial de todas as outras fontes de energia renováveis juntas. Segundo a instituição, o potencial hídrico brasileiro é de 280GW, o eólico de 300GW, enquanto que o potencial solar ultrapassa os 10 mil GW. “Se usássemos células fotovoltaicas nos telhados brasileiros, a geração seria 2,5 vezes a necessária para abastecer todos os domicílios do país”, afirmou o presidente da ABSOLAR (ABSOLAR, 2016).

A Figura 5 apresenta as médias históricas no período entre 2003 e 2013 e também apresenta uma estimativa futura com cenários pessimistas e otimistas, onde a linha azul significa a média entre os dois extremos.



**Figura 4 – Evolução da capacidade instalada de sistemas fotovoltaicos (EPIA – European Photovoltaic Industry Association).**

De acordo de a Figura 5, a capacidade instalada mundial do mercado fotovoltaico cresceu 43% de 2011 para 2012 e 38% de 2012 para 2013. Outro dado

significante é a evolução de quase 500% de crescimento em um período de 5 anos com destaque para a Europa, que apresentou o maior crescimento no período devido a maior aplicabilidade de incentivos.

## **2.2. Regulamentação nacional**

Em 2012, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) publicou a Resolução Normativa nº 482, onde se estabeleceram condições gerais para micro e mini geração distribuída no país, assim como o sistema de compensação de energia através do sistema conhecido atualmente como “*net metering*” (NOTA TÉCNICA DEA 19/14, 2014). Mais tarde, a Resolução Normativa nº 482 foi complementada pela Resolução Normativa nº 517 e posteriormente alterada pela Resolução Normativa 687/15,

A Resolução basicamente permite que consumidores instalem pequenos geradores em suas unidades consumidoras e injetem a energia excedente do sistema na rede elétrica em troca de créditos, que poderão ser utilizados dentro de um prazo de 60 meses.

O Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD) foi criado através do Ministério de Minas e Energia (MME) em 15/12/2015 com o intuito de ampliar a geração distribuída de energia elétrica (principalmente solar) através de fontes renováveis em residências, instalações industriais e comerciais, além de escolas, hospitais e edifícios públicos. Dentre suas metas, está o aumento da participação de fontes renováveis, além da hídrica, de 28% a 33% até 2030 (MME, 2016).

O ProGD possui algumas ações e medidas em curso e outras finalizadas, como a modernização da Resolução 482/12 da ANEEL que alterou o prazo para o consumidor utilizar os créditos com a sobra de energia fornecida para a distribuidora de 3 para 5 anos, a partir de 1 de março de 2016. O consumidor também poderá usar esses créditos para abater a fatura de outros imóveis cuja conta esteja sob sua titularidade, mesmo estando em outros locais. Outra conquista foi referente aos condomínios, que agora podem fazer a compensação de forma conjunta das contas de suas unidades (BARATA, 2016). Em relação aos estímulos fiscais, o consumidor será tributado com ICMS e PIS/COFINS apenas sobre o saldo da energia que ele receber da distribuidora e não conseguir compensar. Os Impostos de Importação que sempre pesaram negativamente sob a geração distribuída no país, até 31 de dezembro de 2016, obtiveram uma redução

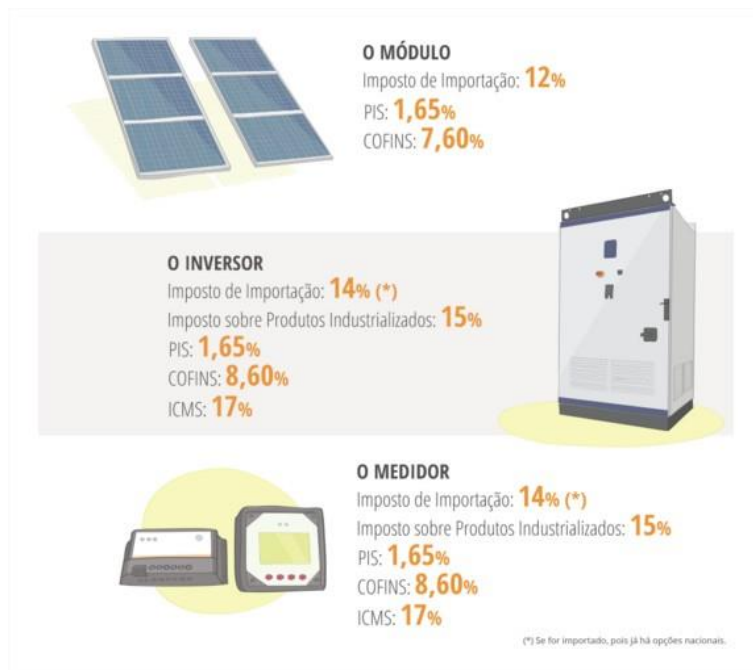
de 14% para apenas 2% a alíquota incidente sobre bens de capital destinados à produção de equipamentos de geração solar fotovoltaica. O BNDES foi autorizado por meio da Lei nº 13.203, de 8 de dezembro de 2015, a apoiar com recursos, a taxas diferenciadas, projetos que envolvam eficiência energética e geração distribuída através de fontes renováveis em escolas e hospitais públicos (BARATA, 2016).

O sistema *net metering* adotado pelo Brasil não oferece a mesma atratividade proporcionada por outros países, de forma que sua inserção recaia sobre a capacidade da própria fonte viabilizar-se economicamente, refletindo sobre um maior prazo para a popularização da fonte (NOTA TÉCNICA DEA 19/14, 2014).

Atualmente, o consumidor que tiver interesse em gerar sua própria energia elétrica através de sistemas fotovoltaicos, pode contar com a isenção do ICMS (Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços) como incentivo. Atualmente 16 estados brasileiros aderiram ao convênio Confaz 16/2016, apresentando um percentual de 76% da população brasileira beneficiada com isenção de ICMS, PIS e COFINS (FREIRE, 2016).

Na prática, a isenção do ICMS passa a ser um estímulo a mais para que qualquer cidadão possa produzir energia elétrica para consumo próprio. A carga excedente gerada durante o dia é injetada diretamente na rede da distribuidora. Essa carga fica armazenada como créditos para o uso quando sua geração é inferior ao consumo, como no período noturno, por exemplo. Antes dessa medida, a Secretaria da Fazenda do Estado (SEFAZ) cobrava do consumidor também o valor do ICMS sobre a energia excedente do sistema (TRIBUNA FEIRENSE, 2016).

Hoje, no Brasil, um sistema fotovoltaico completo custa cerca de 20% a mais do que poderia custar, em razão dos tributos federais, estaduais e municipais que incidem sobre ele. Segundo dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), se o ICMS fosse derrubado em todos os estados, o Brasil apresentaria 55% mais sistemas fotovoltaicos instalados até o ano de 2023 (FOLHA DE SP, 2016). A Figura 3 mostra os tributos incidentes sobre os componentes de um sistema fotovoltaico.



**Figura 5 – Impostos característicos dos SF (ABSOLAR, 2016).**

A taxa de importação desses componentes também é uma das complicações. Para importar um módulo pronto da China, por exemplo, paga-se 12%. Se os componentes fossem enviados para a montagem no Brasil, os impostos seriam ainda maiores, aproximadamente 23,5% (FOLHA DE SP, 2016). É por este motivo que universidades e instituições de todas as regiões do país vêm desenvolvendo estudos e investindo em P&D, buscando a redução dos custos de aquisição e montagem dos módulos e aproximar a tecnologia dos brasileiros, aumentando sua eficiência e reduzindo burocracias para sua implantação.

### **2.3. Conceitos fundamentais**

A fonte motriz para a geração de energia solar são os raios solares. A intensidade desses raios é quantificada em níveis de radiação e irradiação solar, conceitos que muitas vezes acabam sendo confundidos.

A radiação solar é a forma de transferência de energia advinda do Sol, através da propagação de ondas eletromagnéticas ou fótons (FUSANO, 2013). Já a Irradiância Solar, designada pela letra G, constitui uma medida de potência (energia/tempo) por unidade de área. A Irradiância extraterrestre média que chega ao nosso planeta proveniente do sol tem valor aproximado de 1.367W/m<sup>2</sup> e é muito importante para a energia solar fotovoltaica, pois é através dela que se expressa a eficiência de conversão

elétrica de um dispositivo fotovoltaico e constitui-se um parâmetro fundamental para decidir a viabilidade de uma instalação fotovoltaica (ONUDI, 2015).

Estes níveis de irradiância medidos na superfície terrestre são medidas de raios que provavelmente sofreram alguma alteração em sua intensidade devido aos efeitos atenuantes da atmosfera, como a reflexão, absorção (por ozônio, vapor de água, oxigênio e gás carbônico presentes no ar) e também pelos espalhamentos (por moléculas de ar, partículas em suspensão e poluição) (FUSANO, 2013).

A radiação solar que atinge a superfície da Terra é composta por uma fração direta, uma fração difusa, e pelo albedo, conforme mostra a Figura 6. A radiação direta é a que chega segundo a direção do sol, sem sofrer processo de espalhamento ou reflexão, produzindo sombras bem definidas em objetos a ela exposta. Já a radiação difusa é resultado do espalhamento da radiação solar, causado por nuvens e outros componentes da atmosfera (FUSANO, 2013). O albedo é a parcela da luz solar que sofre reflexão pela superfície da Terra.



Figura 6 – Componentes da radiação solar em um dispositivo FV (MACHADO; CORREA, 2015).

Um dispositivo fotovoltaico é capaz de gerar eletricidade através da absorção das componentes direta, difusa e do albedo, de modo que a intensidade da corrente elétrica produzida é diretamente proporcional ao valor da irradiância solar global. De maneira geral, os dispositivos são instalados de forma a gerar prioritariamente através da radiação direta e difusa, componentes energéticos que possuem maior intensidade (ONUDI, 2015).

A seguir serão descritas algumas definições referentes à nomenclatura de equipamentos e arranjos formados por geradores solares fotovoltaicos.

Entende-se por módulo fotovoltaico uma unidade básica formada por um conjunto de células solares, interligadas eletricamente e encapsuladas, com o objetivo de gerar energia elétrica. Um painel fotovoltaico pode ser um ou mais módulos interligados eletricamente, montados de modo a formar uma estrutura única.

Um arranjo fotovoltaico é composto por um ou mais painéis fotovoltaicos interligados, de modo a prover uma única saída de corrente elétrica. Um sistema fotovoltaico é caracterizado pelo conjunto de elementos compostos de arranjos fotovoltaicos, podendo incluir dispositivos para controle, condicionamento, supervisão, proteção e armazenamento de energia elétrica, bem como os sistemas de fixação, fundação e estrutura de suporte (ONUDI, 2015).

Potência de pico (Wp) é a potência nominal de saída de um conversor fotovoltaico, sob as condições padrão de referência para ensaio.

Os sistemas fotovoltaicos são classificados de acordo com a entrega da energia gerada em sistemas isolados e sistemas conectados à rede elétrica de energia.

Sistemas isolados são aqueles que não possuem contato com a rede de distribuição de energia das concessionárias, ou seja, toda a energia gerada pelo conjunto é consumida ou armazenada em um banco de baterias.

Sistemas conectados à rede, também conhecidos como sistemas “*On-Grid*”, fornecem energia tanto para a carga quanto para a rede de distribuição. Todo o potencial gerado é rapidamente escoado para a rede, que age absorvendo energia. Esses sistemas não necessitam de banco de baterias, por este motivo são mais eficientes e geralmente mais baratos (SOUZA, 2015).

## **2.4. Efeito Fotovoltaico**

O gerador FV (fotovoltaico), por definição, é um conversor estático que transforma luz em eletricidade. A geração fotovoltaica faz uso de elementos semicondutores fotossensíveis que convertem radiação solar em uma diferença de potencial nos terminais da junção P-N, que será apresentada a seguir (NAKABAYASHI, 2014).

O fundamento físico da conversão da energia do sol em energia elétrica está no Efeito Fotovoltaico, descoberto por Becquerel em 1839. Becquerel verificou que uma

pequena diferença de potencial em placas metálicas acontecia quando placas de platina ou prata eram mergulhadas em um eletrólito e expostas à luz. Observou-se então, pela primeira vez, o efeito fotovoltaico (ONUDI, 2015). Deste modo, as células fotovoltaicas são fabricadas a partir de um material semicondutor, ou seja, materiais com características intermédias entre um condutor e um isolante (Figura 7).

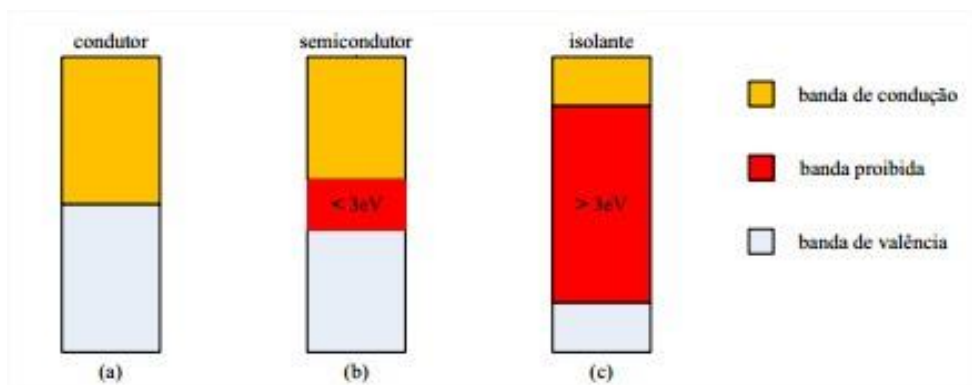


Figura 7 – Estrutura das bandas de energia (a) Condutores (b) Semicondutores e (c) Isolantes (PINHO; GALDINO, 2014).

A grande revolução com relação a difusão desta tecnologia aconteceu a partir dos anos 70, motivada em parte pela primeira crise energética internacional, que alavancou uma tentativa inicial da diversificação das fontes energéticas e promoveu a pesquisa e o desenvolvimento da energia FV como uma fonte energética (ONUDI, 2015).

O termo fotovoltaico significa a transformação direta da radiação solar em corrente elétrica, utilizando células fotovoltaicas, também conhecidas como células solares. O material semicondutor mais utilizado para fabricação de células fotovoltaicas é o Silício (Si), podendo também ser utilizados outros elementos, como o Germânio, o Telureto de Cádmio (CdTe) e outros compostos relacionados ao Disseleneto de Cobre e Índio (SOUZA, 2015). A Figura 8 apresenta as principais tecnologias fotovoltaicas utilizadas comercialmente.

Esta transformação direta da radiação solar em corrente elétrica acontece quando uma lâmina de um semicondutor é primeiramente dopada com impureza trivalente, ou seja, com elementos que possuem três elétrons na camada de valência. Geralmente utiliza-se o Boro, que ao se combinar-se com o silício formam um material com excesso de lacunas (falta de elétrons), caracterizando o material tipo P. Em seguida, nessa mesma lâmina, é feita a difusão de uma impureza pentavalente, ou seja, de elementos



que possuem cinco elétrons na camada de valência, como o Fósforo, que na combinação com o silício forma um material com excesso de elétrons, material tipo N (MACHADO; CORREA, 2015).



Figura 8 – diferentes tipos de módulos FV (ONUDI, 2015)

Esta diferença entre o número de elétrons nas regiões com dopagens distintas, é chamada de junção p-n, região onde cria-se um campo elétrico. A grande maioria das células solares é formada a partir de uma união p-n, na qual são adicionados contatos elétricos a fim de facilitar a circulação dos elétrons. A Figura 9 exemplifica o processo descrito anteriormente.

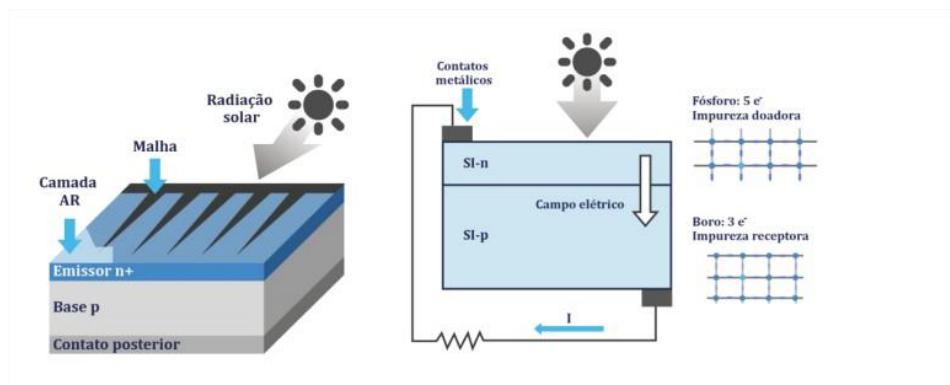


Figura 9 – Esquema construtivo de uma célula fotovoltaica (ONUDI, 2015).

Nem todos os fótons provenientes da radiação solar que atingem um módulo fotovoltaico são capazes de gerar corrente elétrica. Somente aquela fração que apresenta energia igual ou superior ao “*gap*” de energia do material. Este valor é variável e depende das características do semicondutor utilizado. O campo elétrico formado entre as junções separa esses elétrons que estão em transição, formando uma espécie de barreira, impedindo assim que eles voltem a recombinar-se (ONUDI, 2015). Por outro lado, nem todos os fótons que possuem energia superior ao “*gap*” são absorvidos, pois uma parte deles pode atravessar o dispositivo devido ao valor finito do coeficiente de absorção e também da largura do semicondutor. As perdas devido a esse fenômeno são denominadas de perdas de transmissão (PINHO; GALDINO, 2014).

## **2.5. Desempenho de um sistema fotovoltaico**

Os estudos e avaliações de desempenho de sistemas fotovoltaicos são fundamentais para o desenvolvimento contínuo da tecnologia. Para os fabricantes, eles são referenciais de qualidade dos produtos existentes. Para o setor de pesquisa e desenvolvimento de produtos, são medidas importantes para identificar necessidades futuras e pontos de melhoria. Já para o investidor, são essenciais para a definição das expectativas do retorno econômico que será alcançado (PINHO; GALDINO, 2014).

Para melhor dimensionar os dispositivos fotovoltaicos, é de grande importância a determinação das suas características sob condições reais de funcionamento. As características elétricas dos módulos são geralmente estimadas de acordo com sua potência máxima de saída, sob condições de teste padrão. Para realizar testes de desempenho e rotulagem de módulos fotovoltaicos, utilizam-se padrões de irradiância, massa de ar e temperatura, a fim de universalizar as medidas e facilitar as comparações entre distintos arranjos. A Tabela 1 apresenta os valores utilizados como referência para a realização dos testes. A adoção de métodos padronizados de avaliação e classificação reflete em uma maior credibilidade para tecnologia FV, contribuindo para o seu desenvolvimento. Esses valores são conhecidos como Condições Padrão de Teste (STC – Standard Test Conditions) e são obtidos em laboratórios através de um simulador solar (SOUZA, 2015).

Parâmetros	STC
Irradiância (G)	1.000 W/m <sup>2</sup>
Massa de Ar (AM)	1,5
Temperatura da célula	25°C

Tabela 1 – Condições de teste e operação dos módulos FV (Adaptado de SOUZA, 2015).

#### 2.4.1. Temperatura das células fotovoltaicas

A temperatura ambiente é um fator que determina a temperatura de operação das células FV, e tem um papel significativo na geração. O aumento da temperatura de célula provoca diminuição da tensão (de forma quase linear para uma irradiância constante) e elevação da corrente. Todavia, o acréscimo na corrente é muito pequeno e insuficiente para compensar a perda de potência causada pela redução da tensão (PINHO; GALDINO, 2014).

O efeito do aumento da temperatura no desempenho de um painel fotovoltaico geralmente é negligenciado. Porém, estima-se que módulos fotovoltaicos perdem até 7% de sua potência de saída, quando operando em temperaturas próximas a 40°C. Embora a corrente aumente com o aumento da temperatura, o efeito global é uma perda de potência devido a uma maior queda de tensão (SOUZA, 2015)

Este efeito é relevado durante o verão e se agrava quando a instalação encontra-se em edificações onde a redução na ventilação do painel é prejudicada. Normalmente, a potência do gerador FV utilizando tecnologia de silício cristalina decai entre 0,3 e 0,4 % a cada 1°C acima da temperatura padrão de testes dos módulos (FUSANO, 2013).

A Figura 10 mostra algumas curvas I-V para diversas temperaturas da célula fotovoltaica com uma irradiância fixa de 1.000W/m<sup>2</sup>.

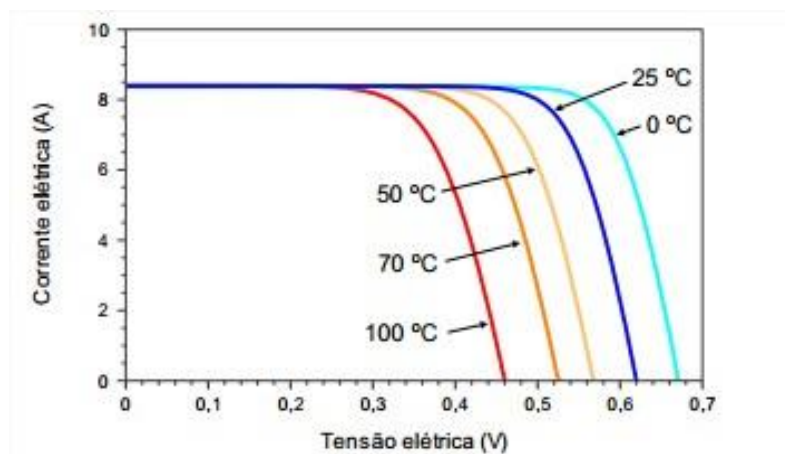


Figura 10 – Influência da temperatura no rendimento da célula fotovoltaica (PINHO; GALDINO, 2014).

Através da Figura 10, fica evidente a queda de tensão com o aumento da temperatura, enquanto que o aumento na corrente é quase imperceptível e não é suficiente para compensar a perda ocorrida na tensão. Em uma célula de silício cristalino, um aumento da ordem de 100°C na temperatura produz uma variação da ordem de -30% na Tensão de circuito aberto dos módulos, enquanto a variação da corrente de curto-circuito é somente de +0,2%. (PINHO; GALDINO, 2014)

Sendo a temperatura de operação característica fundamental para a eficiência da conversão de energia de um módulo fotovoltaico, este trabalho irá realizar um estudo de diversos modelos matemáticos com a finalidade de estimar a temperatura de operação comparando-os à temperatura real medida nos módulos utilizados na Casa Solar Eficiente.

#### 2.4.2. Degradação das células fotovoltaicas

A degradação das células fotovoltaicas são perdas inevitáveis devido ao envelhecimento dos materiais utilizados no revestimento dos módulos fotovoltaicos e da própria célula fotovoltaica que contribui para a gradual redução do desempenho ao longo dos anos. (FUSANO, 2013).

Tratando-se da produtividade energética dos módulos, os fabricantes consideram o valor máximo de 1% como referência para garantia (SUNPOWER, 2008). O valor adotado como premissa neste trabalho é de 0,5% ao ano, visto que a experiência demonstra valores entre 0,2% e 1% como factíveis (BRANKER; PATHAK; PEARCE, 2011).

#### 2.4.3. Disponibilidade do sistema

Além do recurso solar, a disponibilidade de um sistema fotovoltaico injetar energia na rede elétrica depende também de outros fatores, como paradas para manutenção preventiva e falhas nos equipamentos. Normalmente uma instalação fotovoltaica necessita de pouca manutenção devido à robustez de seus componentes (FUSANO, 2013).

#### 2.4.4. Principais índices de mérito técnico utilizados na avaliação de um sistema fotovoltaico.

Índices de Mérito, também conhecidos como índices de desempenho, são fórmulas algébricas que combinam parâmetros de materiais ou equipamentos que, quando maximizadas, aperfeiçoam algum aspecto de desempenho. Sua fórmula algébrica geralmente expressa uma relação entre duas características ou propriedades (FUSANO, 2013).

Os índices de mérito técnico são calculados individualmente para cada sistema através dos valores de energia gerada, potência instalada e irradiação solar incidente. Eles são necessários para a equalização e comparação entre o desempenho de sistemas fotovoltaicos com características distintas ou instalados em outra localidade (MACHADO; CORREA, 2015).

Segundo Benedito (2009), estes parâmetros de desempenho, podem ser utilizados para definir a eficiência global de um sistema fotovoltaico, no que diz respeito ao aproveitamento da radiação solar, produção de energia e os efeitos das perdas do sistema. Estes parâmetros são respectivamente: fator de capacidade (FC) e produtividade anual do arranjo (Ya). Estes índices serão descritos individualmente nos subitens a seguir.

#### 2.4.5. Fator de capacidade

Fator de Capacidade é o índice expresso em percentagem que representa a capacidade de um sistema gerar energia sobre a energia nominal em um intervalo de tempo, normalmente um ano contado em horas. Ele é responsável pela comparação das diferentes fontes de energia e suas respectivas gerações. Nota-se que há uma relação entre o fator de capacidade e a produtividade, e que esta relação é direta, ou seja, obtendo o valor da produtividade obtém-se o valor do fator de capacidade (MACHADO; CORREA, 2015).

Resumidamente, este índice representa a capacidade do sistema gerar energia elétrica em função da energia nominal instalada, considerando que o sistema opera durante as 24 horas do dia (Equação 1). Este índice geralmente é parâmetro muito utilizado na comparação da capacidade de geração de diferentes tipos de fontes energéticas (FUSANO, 2013).

$$FC = \frac{\int_0^T P(t)dt}{T PN} \quad (1)$$

Onde:

P(t) representa a potência entregue pelo sistema no instante t, em kW;

PN representa a potência nominal do sistema, em kW;

T representa o período de integração (geralmente um ano, 8.760 horas).

Por exemplo, dizer que uma usina possui um fator de capacidade de 50% é equivalente a dizer que esta usina gera em um ano a quantidade de energia que geraria trabalhando em sua capacidade nominal durante seis meses.

Sistemas fotovoltaicos possuem fatores de capacidade relativamente baixos se comparados a outros sistemas de geração de energia elétrica. Isto ocorre devido à própria natureza do recurso solar, que é intermitente devido ao movimento da Terra em relação ao Sol e às variações climáticas, variantes entre regiões (FUSANO, 2013). No caso dos sistemas fotovoltaicos brasileiros, o FC normalmente encontra-se entre 13% e 18%, variando de acordo com a disponibilidade do recurso solar e com a eficiência dos módulos fotovoltaicos.

#### 2.4.6. Produtividade do Arranjo

A Produtividade do Arranjo ( $Y_a$ ) é determinada pela Equação 2 e representa uma relação entre o valor médio da energia elétrica gerado em corrente contínua e a potência do sistema. Esta produtividade representa a energia que é subministrada ao usuário antes da sua conversão em corrente alternada normalizada através da potência nominal do arranjo fotovoltaico (VERA; KRENZINGER, 2011).

De forma simplificada, o índice de Produtividade do Arranjo ( $Y_a$ ) de um sistema FV é encontrado através da divisão entre a potência entregue dividida pela potência instalada do sistema fotovoltaico. Ele representa qual a produção anual, em kWh para cada kWp instalado. Este parâmetro também indica o número de horas que o sistema deveria operar, em potência nominal, para gerar a energia entregue no período de um ano.

$$Y_a = \frac{\int_0^T P(t)dt}{PN} \quad (2)$$

Onde:

$P(t)$  representa a energia CC convertida pelo sistema no instante  $t$ , em kW

$P_N$  representa a potência nominal do sistema, em kWp;

$T$  representa o período de integração (8.760 horas).

Este coeficiente representa a produção de energia (kWh) por cada unidade de potência (kW) e, deste modo, é uma forma interessante de comparar o desempenho entre sistemas com potências diferentes.

O  $Y_a$  é calculado dividindo-se o total de energia gerada, registrada através de um medidor, em kWh, pela potência CC equivalente a soma das potências de cada módulo fotovoltaico instalado no painel. Como esta potência é definida nas condições padrões de ensaio, onde se tem a incidência de 1000 W/m<sup>2</sup> de irradiância e o controle de temperatura das células em 25°C, a Equação 2 oferece a vantagem de relacionar a energia CC entregue ao sistema com uma condição padrão, permitindo a comparação com outros sistemas, excluindo-se à eficiência de conversão CC para CA (FUSANO, 2013).

Pode-se resumir este coeficiente como uma relação entre a energia, de fato, gerada pelo arranjo pela a potência nominal do gerador fotovoltaico.

## **2.6. Casa solar**

Este item apresenta as características construtivas e também os sistemas elétricos instalados na Casa Solar Eficiente (CSE), de onde foram registrados dados de geração elétrica que serviram como base para a elaboração deste trabalho. As informações a seguir foram retiradas através do site do CRESESB na página referente à Casa Solar Eficiente – CSE (CEPEL / CRESESB, 2014).

A Casa Solar Eficiente localiza-se nas instalações do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (CEPEL) da Ilha do Fundão - Rio de Janeiro, e faz parte do Centro de Aplicação de Tecnologias Eficientes (CATE) do CEPEL e do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB). Durante o projeto e sua construção, a CSE contou com a participação de diversas instituições como o Ministério de Minas e Energia (MME) e a ELETROBRÁS, por exemplo.

Um dos principais objetivos deste projeto é servir como agente multiplicador para a utilização das tecnologias solar térmica, fotovoltaica e eólica, bem como o auxílio de técnicas de combate ao desperdício energético, uma vez que possui todos os

equipamentos eletroeletrônicos eficientes do ponto de vista de conservação de energia alimentados por painéis fotovoltaicos e um aerogerador.

Operando desde julho de 1997 a Casa Solar Eficiente recebeu até o final de 2012, quase 16.000 visitantes, entre professores e alunos de segundo grau e universidades, profissionais da área e público em geral. A seguir serão descritos os sistemas de geração bem como os principais equipamentos que compõem o sistema.

#### 2.5.1. Sistema de geração fotovoltaica

A Casa Solar Eficiente (CSE) é uma casa pré-fabricada com sua necessidade energética totalmente suprida por fontes de energia solar e eólica. O sistema de geração de energia elétrica (SGEE) da casa é constituído por dois arranjos de módulos fotovoltaicos de silício policristalino (pSi), um fixo e outro móvel com sistema de rastreamento solar, somando uma potência de aproximadamente 1990 watt pico (Wp), e também um aerogerador de 1 kW, conforme ilustra a Figura 11.

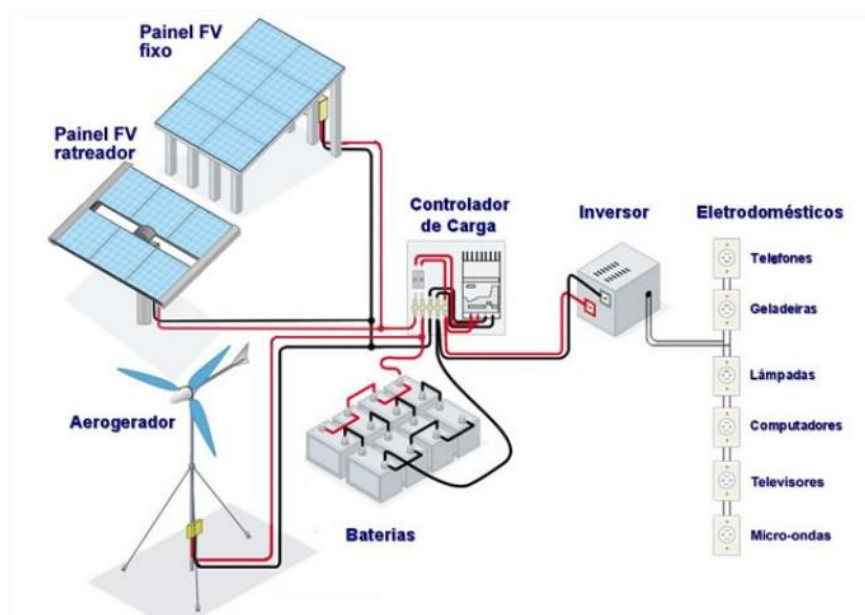


Figura 11 - Configuração do sistema de geração da CSE (CEPEL/CRESESB,2014).

O sistema elétrico da CSE possui as seguintes características:

- Arranjo Fotovoltaico (fixo + rastreamento) – 1993Wp.
- Banco de Baterias – 750Ah / 48Vcc.
- Inversor – 48Vcc/120Vca 60Hz – 4kW.
- Autonomia: 72h.
- Consumo Projetado: 7,4kWh/dia.
- Radiação Média Anual: 4,75 – 5,25 kWh/m<sup>2</sup>/dia. (FONTE: INPE, 2006).



### 2.5.2. Painei fixo

O painei fotovoltaico fixo, instalado no telhado da varanda, é composto por 32 módulos fotovoltaicos. Os módulos são agrupados em ligações em série de quatro módulos cada, conseguindo-se uma tensão de 48 Volts CC. Os oito grupos-série de quatro módulos são então ligados em paralelo. O painei fotovoltaico fixo possui uma potência total de 1.450 Wpico. O painei fixo está posicionado para o norte com uma inclinação de 22,5° (correspondente à latitude da cidade do Rio de Janeiro).

### 2.5.3. Painei com rastreamento solar

O painei fotovoltaico com o rastreador foi montado na frente da Casa Solar e possui uma estrutura que acompanha o movimento aparente do Sol ao longo dos dias no sentido Leste - Oeste. Ele é composto por 12 módulos fotovoltaicos ligados em grupos-série de quatro módulos cada (48 Volts CC em cada grupo) associados em paralelo. O sistema fotovoltaico com o sistema de rastreamento possui potência total de 540 Wp. O sistema de rastreamento solar da estrutura é um sistema passivo, que funciona com base no deslocamento de um gás entre dois braços ocios situados em lados opostos da estrutura. Dependendo da posição do Sol um dos braços será mais aquecido que o outro, provocando a expansão do gás que se deslocará para o braço menos aquecido. O deslocamento do gás provoca o desbalanceamento do peso da estrutura, causando sua inclinação para o lado do braço mais pesado (braço menos aquecido pelo Sol).

O ganho de aproveitamento da irradiação solar dessa estrutura móvel com rastreamento solar é da ordem de 15 a 20% se comparada com a montagem fixa dos módulos fotovoltaicos. A tensão gerada pelo sistema fotovoltaico é de 48 Volts, em corrente contínua (CC). Como todos os equipamentos utilizados na Casa Solar funcionam em corrente alternada (CA), utiliza-se um inversor que fará a conversão CC/CA.

### 2.5.4. Banco de baterias

O banco de baterias é o sistema de armazenamento de energia utilizada na Casa Solar Eficiente para fornecer energia durante a noite ou em dias chuvosos, quando a geração dos módulos fotovoltaicos é nula ou insuficiente (baixos níveis de irradiação

solar). Ele foi dimensionado para atender, considerando as baterias inicialmente carregadas, um consumo diário de 7,4 kWh por três dias consecutivos sem o fornecimento de energia pelos painéis fotovoltaicos e pelo aerogerador. Isso corresponde a uma capacidade de armazenamento de energia útil de aproximadamente 22,3 kWh.

O banco de baterias é composto por 20 baterias de chumbo-ácido estacionárias seladas de 150 Ah/12 Volts em C20 (com ciclo de descarga profundo) conectadas em 5 arranjos de 4 baterias associadas em série ligados em paralelo, operando com tensão de 48 Volts CC.

#### 2.5.5. Controlador de carga

A energia gerada pelos painéis fotovoltaicos vai para o sistema de controle de carga, composto pelos controladores de carga e descarga. O objetivo do sistema de controle de carga é gerenciar o fluxo de energia, ou seja, armazena a energia excedente ou solicita a energia armazenada nas baterias, caso a energia gerada pelos painéis num determinado instante não seja suficiente para atender ao consumo.

#### 2.5.6. Sistema de aquisição de dados

O Sistema de Aquisição de Dados (SAD) da Casa Solar Eficiente realiza as atividades de coleta, processamento e armazenamento de dados medidos de fenômenos físicos e climáticos que caracterizam o comportamento do sistema de geração de energia elétrica. A figura 12 mostra a disposição do SAD junto ao projeto utilizado para adquirir e armazenar os fluxos energéticos em um banco de dados.

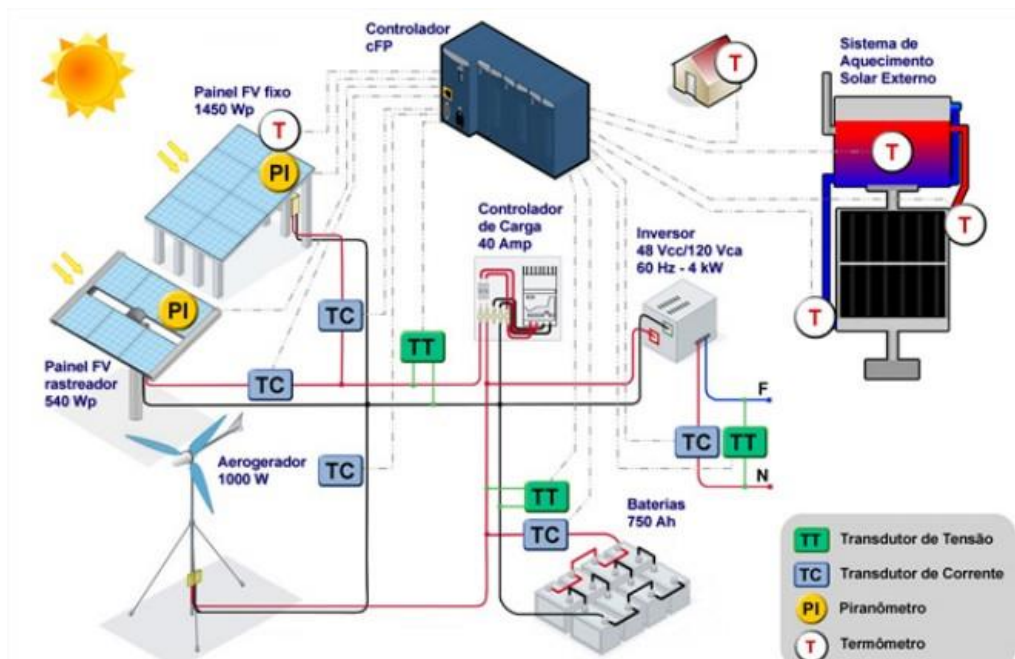


Figura 12 – Configuração do Sistema de Aquisição de Dados utilizado (CEPEL/CRESESB, 2014).

O SAD fornece dois tipos de saída de dados:

- Medição em tempo real: apresenta séries de valores medidos em intervalos de 1 segundo durante um período determinado. Os dados mais antigos são descartados;
- Histórico de dados medidos: contém estatísticas de intervalos de 5 minutos (300 valores medidos a cada 1 segundo).

Para a realização da análise energética deste trabalho, foram utilizados os históricos de dados medidos e armazenados durante o ano de 2014, retirados diretamente do site da CRESESB.

### 3. METODOLOGIA

Nas seções a seguir, será descrita a metodologia utilizada para organizar os dados gerados pelo SAD do sistema fotovoltaico e realizados os respectivos cálculos dos índices de mérito técnico apresentados na seção anterior, para então realizar a análise energética da residência.

### 3.1 Coleta de dados

O Sistema de Aquisição de Dados (SAD) da Casa Solar Eficiente disponibiliza os resultados em uma planilha formato Excel® com dados diários intervalados em 5 minutos. Os dados estão disponíveis a todos os usuários através do site da Cresesb. O sistema oferece resultados de todos os equipamentos utilizados no projeto, desde valores de irradiância, a valores de temperatura e potência instantânea do arranjo. Para a realização deste trabalho, foram analisados dados de geração durante os 12 meses do ano de 2014. A Figura 13 apresenta a planilha referente ao mês de Abril.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M										
29	Intervalo de Amostragem:5 min																						
30																							
31	Intervalo de Dados consultado: 01/04/2014 - 30/04/2014																						
32																							
33	Intervalo da Série de Dados: 01/04/2014 - 30/04/2014																						
34	Agrupamento da Série de Dados: 5/5min																						
35	Número de Dados: 8634 / 8640																						
36																							
37	Fonte: www.cresesb.cepel.br																						
38																							
39	data	VCA_med	VCA_max	VCA_min	VCA_dp	ICA_med	ICA_max	ICA_min	ICA_dp	VFV_med	VFV_max	VFV_min	VFV_dp	I									
40	2014-04-01 00:00:00	"122.1"	"122.1"	"121.8"	"0.1"	"0.9"	"0.9"	"0.0"	"2.8"	"2.8"	"2.7"	"0.0"	"0.1"	"0.2"	"0.1"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"
41	2014-04-01 00:05:00	"121.7"	"122.1"	"120.2"	"0.8"	"1.1"	"3.1"	"0.9"	"0.4"	"2.7"	"4.5"	"2.6"	"0.1"	"0.1"	"0.2"	"0.1"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"
42	2014-04-01 00:10:00	"120.2"	"120.2"	"120.2"	"0.0"	"1.6"	"1.6"	"1.6"	"0.0"	"2.7"	"2.8"	"2.7"	"0.0"	"0.1"	"0.2"	"0.1"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"
43	2014-04-01 00:15:00	"120.3"	"121.7"	"120.2"	"0.4"	"1.6"	"2.0"	"0.9"	"0.2"	"2.8"	"2.8"	"2.7"	"0.0"	"0.1"	"0.2"	"0.1"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"
44	2014-04-01 00:20:00	"121.5"	"121.5"	"121.4"	"0.0"	"1.7"	"1.7"	"1.7"	"0.0"	"2.8"	"2.9"	"2.7"	"0.0"	"0.1"	"0.2"	"0.1"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"
45	2014-04-01 00:25:00	"121.3"	"121.5"	"114.0"	"0.6"	"2.1"	"8.6"	"1.7"	"0.7"	"2.7"	"3.2"	"2.6"	"0.1"	"0.1"	"0.2"	"0.1"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"
46	2014-04-01 00:30:00	"121.1"	"121.1"	"121.1"	"0.0"	"2.8"	"2.9"	"2.8"	"0.0"	"2.7"	"2.8"	"2.6"	"0.1"	"0.1"	"0.2"	"0.1"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"	"0.0"

Figura 13 – Dados disponibilizados pelo Cresesb referentes à Abril/2014 (CEPEL/CRESESB, 2014).

De forma simplificada, são disponibilizados 8.928 dados por mês para cada equipamento de medição nos meses com 31 dias, e 8.640 dados mensais referentes aos meses com 30 dias de duração.

Para a realização dos cálculos e das simulações, foram calculadas médias mensais e, em alguns meses críticos, médias diárias da irradiância nos módulos fixo e com rastreamento, da temperatura ambiente e média do módulo fixo e das potências instantâneas de ambos os módulos. A Tabela 2 apresenta uma síntese com as médias mensais das principais características do sistema trabalhado.

	Irradiância FV Fixo [W/m <sup>2</sup> ]	Irradiância FV com rastr. [W/m <sup>2</sup> ]	Temperatura média FV fixo [°C]	Temperatura ambiente [°C]	Potência FV Fixo [W]	Potência FV com rastr [W]
Janeiro	206,20	282,51	39,93	27,34	127,67	44,25
Fevereiro	221,93	293,24	39,75	27,17	129,27	74,45
Março	180,41	222,44	36,55	25,26	132,69	70,49
Abril	156,24	182,00	33,79	23,25	114,73	53,59
Mai	128,32	143,29	30,90	21,67	114,57	53,21
Junho	126,34	135,07	31,05	21,30	44,33	16,59
Julho	115,37	124,37	20,36	20,34	49,96	17,83
Agosto	136,73	145,60	30,45	20,53	46,25	15,11
Setembro	158,61	183,30	33,28	22,34	41,75	16,33
Outubro	171,48	208,94	34,88	23,11	44,75	18,65
Novembro	149,54	174,03	34,91	24,05	47,61	15,93
Dezembro	175,86	209,47	38,31	26,25	64,38	0,722

**Tabela 2 – Médias mensais das principais características do sistema de geração fotovoltaica da CSE (AUTOR, 2016).**

De acordo com a Tabela 2, pode-se perceber que os maiores valores são registrados no período de Dezembro a Março, o que condiz com a realidade da cidade do Rio de Janeiro, visto que é a estação mais quente do ano (verão). O resumo apresentado tabela 2 foi detalhado em todos os 12 meses de 2014, considerando-se as 24 horas do dia.

### **3.2 Análise dos índices de radiação solar**

A primeira análise executada foi a validação dos níveis de irradiância capturados através do piranômetro, instalado na superfície do módulo fotovoltaico fixo, com os valores obtidos mediante simulação utilizando o software System Advisor Model (SAM).

O SAM é um software desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Energias Renováveis (NREL), entidade subordinada ao Departamento de Energia dos Estados Unidos com a colaboração do Laboratório Nacional Sandia em 2005. Ele permite simular diversos sistemas fotovoltaicos, eólicos, concentradores solares e plantas à biomassa e disponibiliza uma série de valores que facilitam na decisão da viabilidade de um projeto bem como as características de funcionamento do sistema (NREL, 2016).

### 3.3 Modelo de temperatura de operação do módulo

Com os dados da temperatura ambiente disponibilizados através do Sistema de Aquisição de Dados da CSE e com os valores de irradiância registrados através dos piranômetros instalados na estrutura de fixação dos módulos, realizou-se cálculos baseados em diversas fórmulas empíricas encontradas na literatura que correlacionam ambas características com a temperatura de operação de módulos fotovoltaicos. Essas simulações são de extrema importância, pois como já apresentado, o aumento da temperatura de operação dos módulos acarreta em uma redução na eficiência de conversão elétrica. Segundo Onudi (2015), a Equação 3 é frequentemente encontrada na literatura para estimar a temperatura de operação de módulos fotovoltaicos, onde  $T_{NOCT}$  é a temperatura de operação do módulo fotovoltaico na condição irradiância de 800 W/m<sup>2</sup>, na temperatura ambiente de 20°C com velocidade do vento inferior a 1 m/s e  $G$  é a irradiância medida em W/m<sup>2</sup>.

$$T = T_{amb} + \left( \frac{T_{NOCT} - 20}{800} \right) \cdot G \quad (3)$$

Outra fórmula empírica comumente utilizada para estimar a temperatura de operação de módulos fotovoltaicos de silício policristalino é apresentada por Lanier e Ang (1990) apud Kalogirou e está descrita através da Equação 4.

$$T = 30 + 0,0175 (G - 300) + 1,14 (T_{amb} - 25) \quad (4)$$

Os resultados obtidos através das Equações 3 e 4 serão comparados com os valores registrados pelo termostato instalado na superfície do módulo FV fixo.

Apud Kalogirou ainda apresenta a Equação 5 como uma outra alternativa para estimar a temperatura de operação dos módulos de silício cristalino. Esta equação é função da temperatura nominal de operação do módulo, da eficiência do módulo no ponto de máxima potência ( $\eta$ ) e também do índice transmissividade/absortividade ( $\tau\alpha$ ).

$$T = (T_{noct} - T_{amb}) \left( \frac{G}{G_{noct}} \right) \left( 1 - \frac{\eta}{\tau\alpha} \right) + T_{amb} \quad (5)$$

Na Equação 5,  $G_{noct}$  é a irradiância total nas condições nominais de operação e  $T_{noct}$  é a temperatura nominal de operação da célula fotovoltaica (valor fornecido pelo fabricante do módulo).

King et al., 2004 apud Dias (2006) apresentam as Equações 6 e 7 utilizados no modelo de desempenho Sandia com base em estudos empíricos tendo como dados base a temperatura ambiente, a irradiância e também a inclusão do fator velocidade do vento ( $vv$ ). A Equação 6 ainda utiliza outros dois coeficientes (**c** e **d**) determinados experimentalmente. O coeficiente  $c$  possui valor -3,56 e estabelece o limite superior da temperatura do módulo em baixas velocidades do vento e com alta irradiância. Já o índice  $d$  é expresso para definir a taxa de elevação da temperatura do módulo em função do aumento da velocidade do vento e seu valor é fixo em -0,0750 segundo Dias, 2006. O valor do  $\Delta T$  na Equação 7 é igual a 3.

$$T_c = G (e^{c+d vv}) + T_{amb} \quad (6)$$

$$T = T_c + \left( \frac{G}{G_{ref}} \right) \Delta T \quad (7)$$

Uma correlação mais geral, função somente da temperatura ambiente e da irradiância é apresentada por Dias (2006) através da Equação 8.

$$T = (0,0332 - 0,0002T_{amb})G + 0,908Ta + 2,1 \quad (8)$$

Por fim, será utilizado também o modelo proposto por TamizhMani et al. (2002) apud Beltrão apresentada na Equação 9. Esta equação é função apenas de três variáveis, velocidade do vento, temperatura ambiente e irradiância.

$$T = 0,943T_{amb} + (0,028)G - (1,528)Vv + 4,3 \quad (9)$$

Skoplaki et al. (2008) apresenta a Equação 10, onde a mesma é função de um parâmetros distinto dos apresentados na demais equações. O  $\dot{\omega}_m$  é o coeficiente de montagem e seu valor está apresentado na Tabela 3.

$$T = T_{amb} + \dot{\omega}_m \left( \frac{0,32}{8,91 + 2 vv} \right) G \quad (10)$$

Montagem	Coeficiente de montagem ( $\phi_m$ )
Livre/ Em pé	1,0
Telhado Plano	1,2
Telhado Inclinado	1,8
Fechada Integrada	2,4

**Tabela 3 – Valores de coef. de montagem para várias situações de arranjos fotovoltaicos (Skoplaki et al, 2008).**

Serão feitas simulações e comparações entre as sete equações apresentadas junto as medições realizadas instantaneamente nos próprios módulos. Através desta análise, vamos verificar qual modelo apresentou menor variação e também, apresentar uma análise dos erros relativos entre as medições.

### **3.4 Cálculo dos índices de mérito técnico**

Para realizar os cálculos do Fator de Capacidade e da Produtividade anual do arranjo, utilizou-se as equações 1 e 2 apresentadas anteriormente no item 2.4.4. Com o auxílio do *software* SAM foi simulado um sistema semelhante ao utilizado na Casa Solar Eficiente e comparado os valores simulados do Fator de Capacidade e produtividade do arranjo com os calculados através do dando de dados do sistema de aquisição de dados.

## **4. RESULTADOS**

A seguir serão apresentados os resultados obtidos através dos cálculos e das simulações. É importante ressaltar que o sistema fotovoltaico da Casa Solar Eficiente está em operação há 19 anos. Devido a uma alteração entre os dados registrados durante o ano de 2014, somente serão apresentados os resultados energéticos referentes ao primeiro semestre do ano em questão, pois todos os índices energéticos calculados apresentam uma grande variação entre os valores registrados entre os dois semestres do ano em questão. Este não é o comportamento esperado do sistema e sem dúvidas houveram problemas no sistema de aquisição de dados da energia gerada pelo sistema no período de Junho à Dezembro.



## 4.1 Irradiação

Como já apresentado, a irradiação é um parâmetro fundamental para um bom desempenho e funcionamento de sistemas fotovoltaicos. Com base nisso, abaixo estão apresentadas as simulações computacionais utilizando os dados de irradiação solar disponibilizados através do *software* SAM comparadas aos níveis de irradiação registrados pelo SAD da Casa Solar Eficiente. Através dessa análise, será possível concluir se o sistema operou da maneira esperada durante o ano e, também o comportamento do piranômetro utilizado. O Sistema de Aquisição de Dados registra os níveis de irradiância em intervalos de 5 minutos tanto para o sistema fixo como para o sistema de rastreamento através de um piranômetro instalado na superfície dos módulos. A Figura 14 apresenta a irradiância mensal em média diária no plano do painel fixo e no plano do painel com rastreador solar.

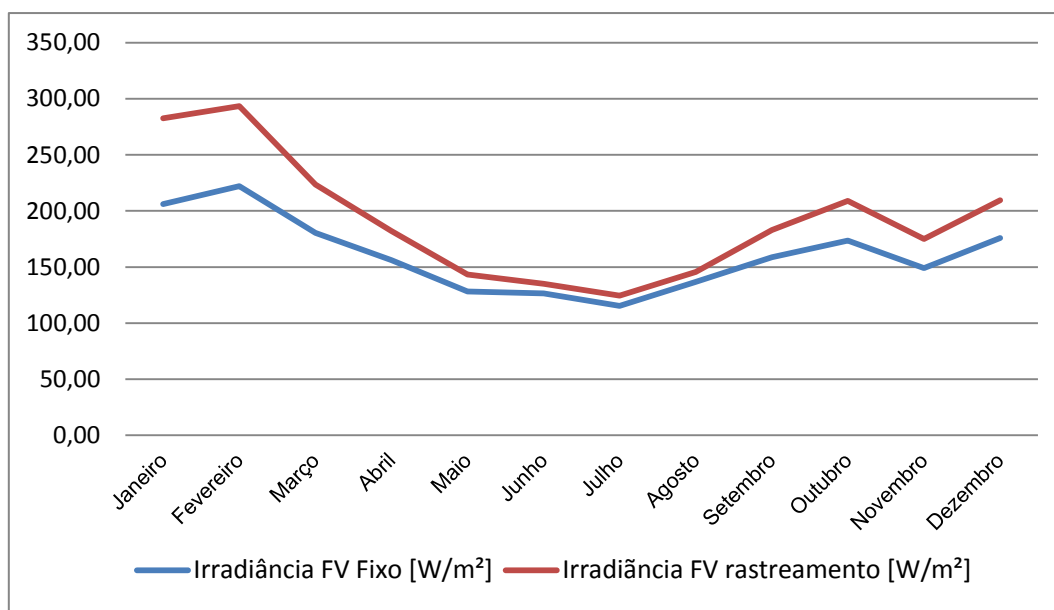


Figura 14 – Irradiação capturada no sistema FV Fixo e no sistema c/ rastreamento (AUTOR, 2016).

De acordo com a Figura 14, pode-se observar um padrão entre as medições de ambos os sistemas. Como os dois sistemas estão localizados em proximidade, é esperado que os níveis coletados entre eles sejam semelhantes ou até mesmo, iguais em certos períodos do dia. Da mesma forma, espera-se que a média registrada pelo sistema com rastreamento solar seja superior ao módulo fotovoltaico fixo, cuja maior vantagem desta configuração, está justamente em um maior aproveitamento da fração direta da radiação solar.

A Figura 15 foi obtida através do auxílio do *software* SAM, simulando um sistema fotovoltaico localizado na cidade do Rio de Janeiro – RJ. Através do banco de dados disponível no próprio *software* foi possível analisar e comparar os índices de irradiação medida, apresentados na Figura 16 com os utilizados pelo banco de dados do SAM para simulações de diversos sistemas fotovoltaicos. Os dados atmosféricos utilizados no *software* SAM possuem como referência o banco de dados disponibilizado através do National Solar Resource Database (NSRDB), do Solar and Wind Energy Resource Assessment Programme (SWERA) e também do Canadian Weather for Energy Calculations (CWEK), abrangendo praticamente todas as regiões do globo terrestre (NREL, 2016).

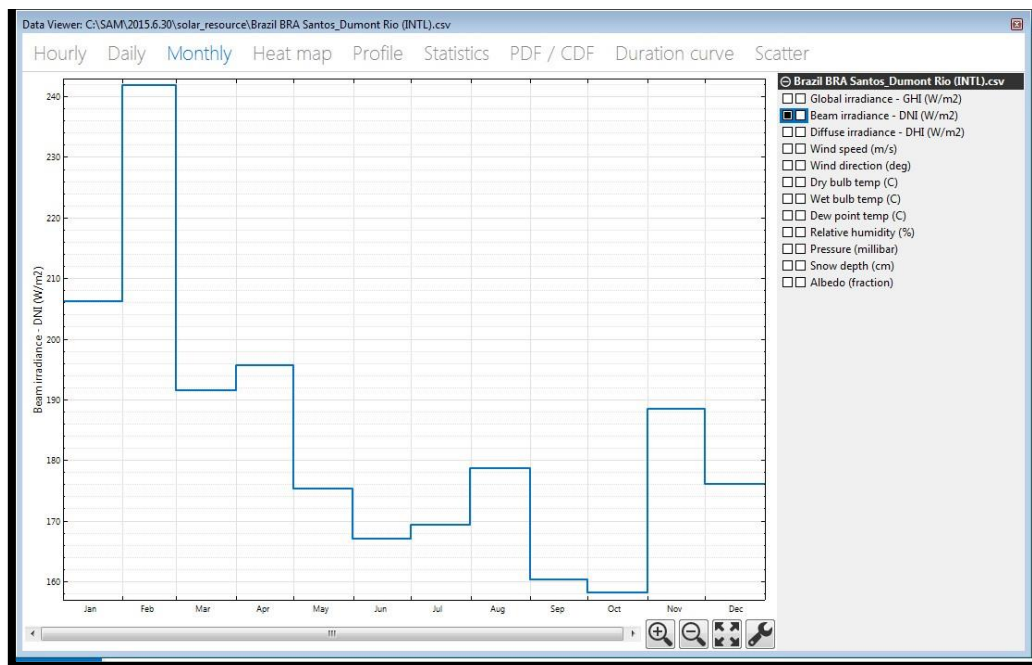
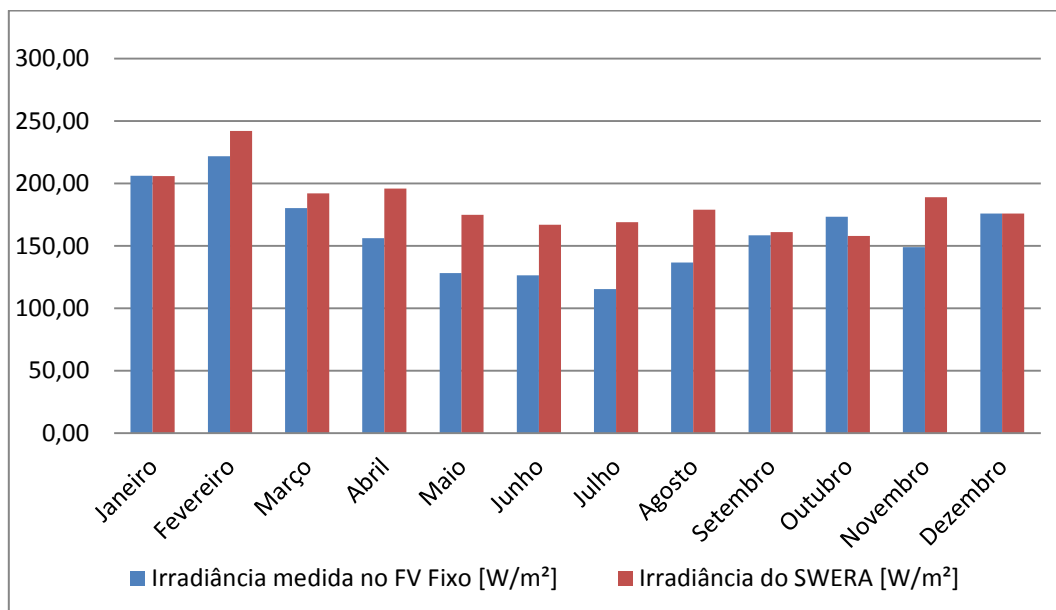


Figura 15 - Dados da Irradiância média de acordo com o software SAM (SAM).

Como a Figura 15 apresenta os dados referente a sistemas fixo, ou seja, sistemas que não possuem a capacidade de rastrear o sol durante todo o período disponível dos dias, ficando fixo e capturando a radiação voltado sempre para a mesma inclinação. Esta inclinação geralmente é próxima à latitude da cidade da instalação do sistema, isso permite que mesmo não possuindo um sistema de acompanhamento solar, ele consiga capturar níveis de irradiação mais homogêneos durante o ano.

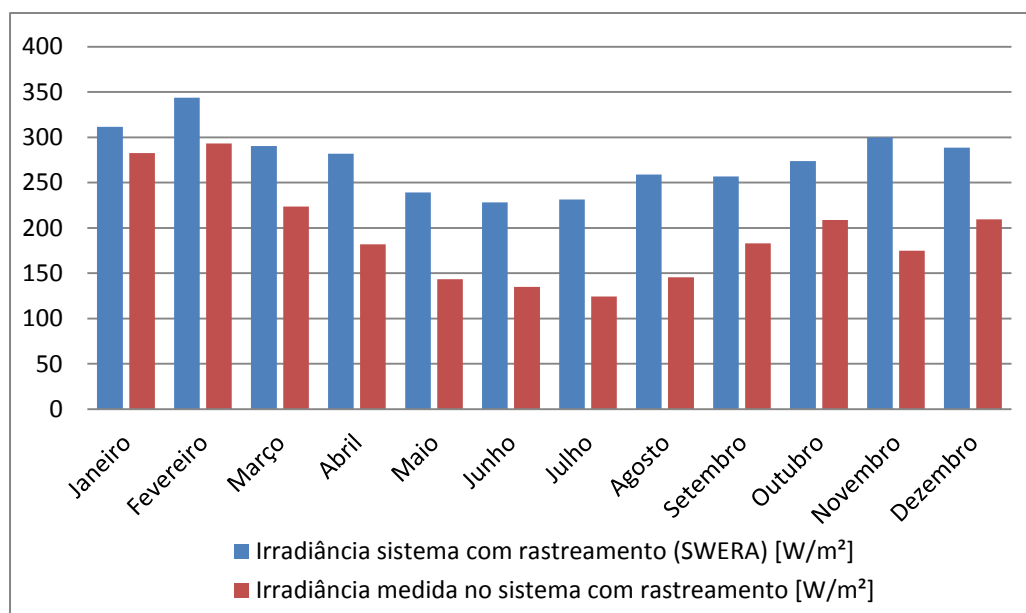
Para tornar a comparação mais justa, utilizamos o *software* SAM para simular um sistema com rastreamento semelhante ao utilizado na CSE. Obviamente espera-se uma diferença entre os resultados, visto que os sistemas são semelhantes, porém não são

iguais. As figuras 16 e 17 apresentam comparações para as duas configurações utilizadas entre as medições feitas pelo sistema de aquisição de dados (fixo e com rastreador) e os dados adquiridos através do *software*. Os dados apresentados no gráfico foram retirados através da simulação computacional e representam dados de irradiância em média diária mensal, ou seja, são dados de médias diárias de irradiância para cada mês.



**Figura 16 – Gráfico comparativo entre a irradiância medida através do SAD x Banco de dados do SAM (AUTOR, 2016).**

Através do comparativo apresentado na figura 16, conclui-se que os dados de irradiação medidos estão pouco abaixo dos utilizados no software. Pode-se observar também, que embora as medições estejam abaixo, elas seguem um comportamento característico durante o ano e, durante os meses de Janeiro, Setembro e Dezembro os erros registrados são de praticamente 0%.



**Figura 17 - Gráfico comparativo entre a irradiância medida através do SAD x Banco de dados do SAM (AUTOR, 2016).**

A Figura 17 mostra novamente uma superioridade dos níveis utilizados no software em relação aos registrados no sistema com rastreamento solar. Durante os meses mais quentes do ano (Janeiro, Fevereiro e Março), a diferença registrada é pouco significativa, enquanto a maior discrepância acontece durante os meses centrais (Maio, Junho e Julho).

A partir dos resultados apresentados nas figuras 16 e 17 conclui-se que os dados do *software* estão atualizados e de acordo com a realidade da cidade do Rio de Janeiro. As maiores diferenças no ano foram registradas durante os meses centrais para o sistema com rastreamento solar, onde o erro relativo entre as medições chegou a praticamente 80%, e 40% no mês de Julho no sistema fotovoltaico fixo. Por outro lado, durante o mês de Janeiro e Dezembro o erro entre as medidas e os dados do software não ultrapassou 0,10%. A Tabela 4 apresenta a síntese com os desvios relativos a todos os meses de 2014, onde nela os valores disponibilizados pelo *software* são comparados à medições registradas nos dois sistemas.

<b>Desvio relativo entre a irradiância medida e as irradiâncias simuladas através do SAM (SWERA) para os dois sistemas (Fixo e com rastreamento) [%]</b>		
	Sistema Fixo	Com Rastreamento
Janeiro	0,10	10,35
Fevereiro	9,04	17,22
Março	6,42	30,03
Abril	25,45	54,92
Maió	36,0	66,82
Junho	32,18	68,92
Julho	46,49	86,0
Agosto	30,91	77,7
Setembro	1,51	40,23
Outubro	8,92	31,09
Novembro	26,73	71,41
Dezembro	0,08	37,83

**Tabela 4 – Erro relativo entre os valores disponibilizados pelo SWERA versus os dois sistemas FV utilizados (AUTOR, 2016).**

Através da Tabela 4, observa-se que o sistema com rastreamento solar apresentou maiores distorções durante todo o ano. Este resultado de certa forma já era esperado, uma vez que é justamente esta configuração que apresenta maiores aproximações, como por exemplo, o deslocamento angular e o funcionamento do sistema de rastreamento solar. Através dos resultados apresentados na Tabela 4, conclui-se que o rastreamento solar utilizado na Casa Solar Eficiente precisa ser melhor calibrado ou atualizado, pois poderia estar capturando níveis de irradiação bastante superiores durante pelo menos, 4 meses no ano.

Embora exista um desvio considerável durante os meses de Maio, Junho, Julho e Agosto, durante o restante do ano o software apresentou uma boa aproximação, mostrando-se como uma ferramenta bastante confiável para a realização das simulações.

## **4.2 Temperatura de operação**

Concluída a etapa de verificação das medições da irradiância nos módulos da CSE, foi realizada uma análise dos modelos propostos na literatura para estimar a temperatura de operação de módulos fotovoltaicos com tecnologia de silício poli cristalino comparando-os com os valores medidos instantaneamente através de um termopar instalado na superfície superior do módulo fotovoltaico fixo.

A Figura 18 apresenta a temperatura de operação do módulo fotovoltaico fixo medido diretamente no equipamento, comparado aos resultados calculados através da equação 6, apresentada segundo Onudi, (2015).

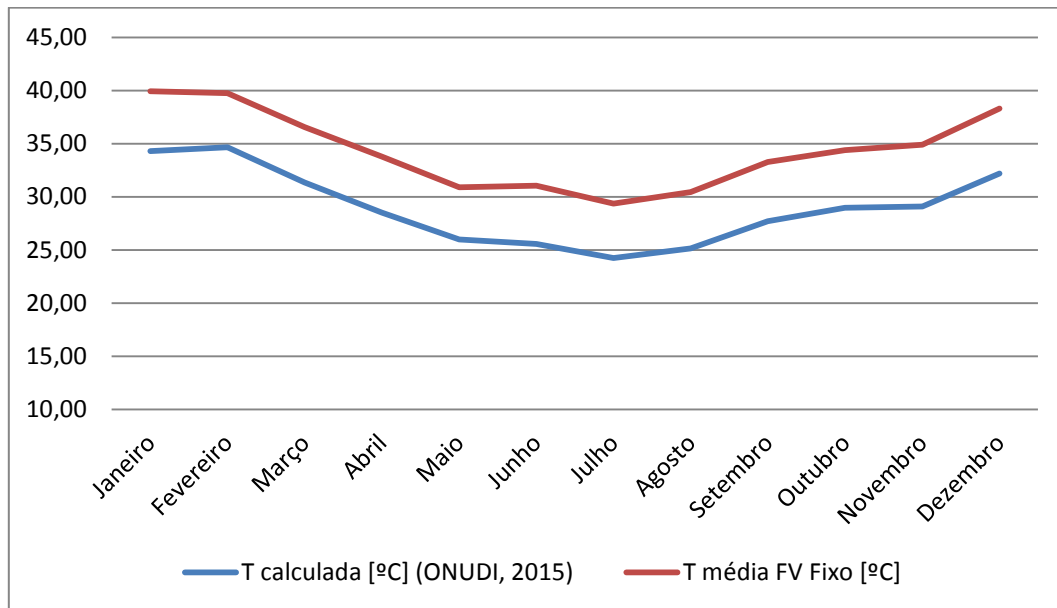


Figura 18 – Temperatura de operação do módulo medida x calculada segundo Onudi, 2015.

A Figura 18 mostra que existe um erro constante entre a temperatura calculada se comparada à temperatura medida no próprio módulo. Embora exista uma distinção entre as duas curvas, é possível perceber que ambas possuem um comportamento característico padrão durante todos os meses do ano, com uma diferença de aproximadamente 5°C.

Utilizando a metodologia apresentada por Lanier e Ang (1990) com a equação 5, os resultados obtidos são diferentes se comparados à metodologia utilizada por Onudi, 2015 (Figura 19). Os resultados mostram novamente a existência de um delta T entre a temperatura medida e a teórica, mais que ambas seguem um mesmo perfil de comportamento médio mensal com uma diferença pouco mais acentuada, passando dos 5°C para aproximadamente 8°C.

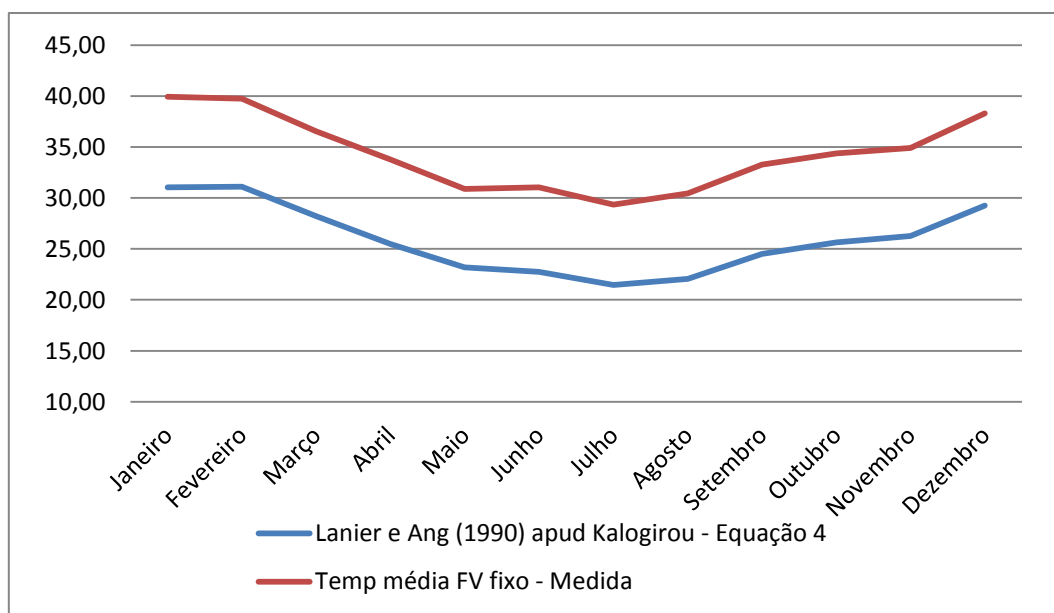


Figura 19 – Temperatura medida x calculada segundo Lanier e Ang, 1990 apud Kalogirou.

A seguir serão apresentados os resultados levando em consideração os outros 5 modelos frequentemente encontrados na literatura e analisados neste trabalho, com o intuito de descobrir qual equação mais se aproxima da realidade para este caso específico e, tentar encontrar alguma justificativa para o gradiente de temperatura existente entre os gráficos apresentados acima.

Os valores calculados utilizando a equação 6 proposta por Lanier e Ang (1990) apud Kalogirou estão dispostas na Figura 20.

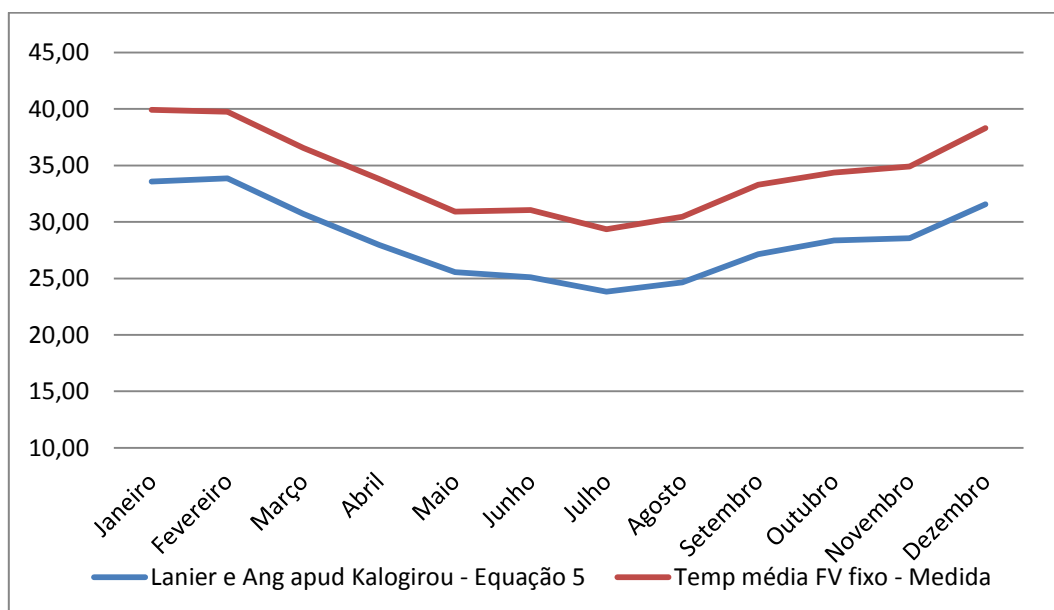


Figura 20 - Temperatura medida x calculada segundo Lanier e Ang, 1990 apud Kalogirou.

A Figura 21 apresenta os resultados obtidos através do modelo proposto por King et al. (2004) utilizando as Equações 6 e 7 apresentadas anteriormente.

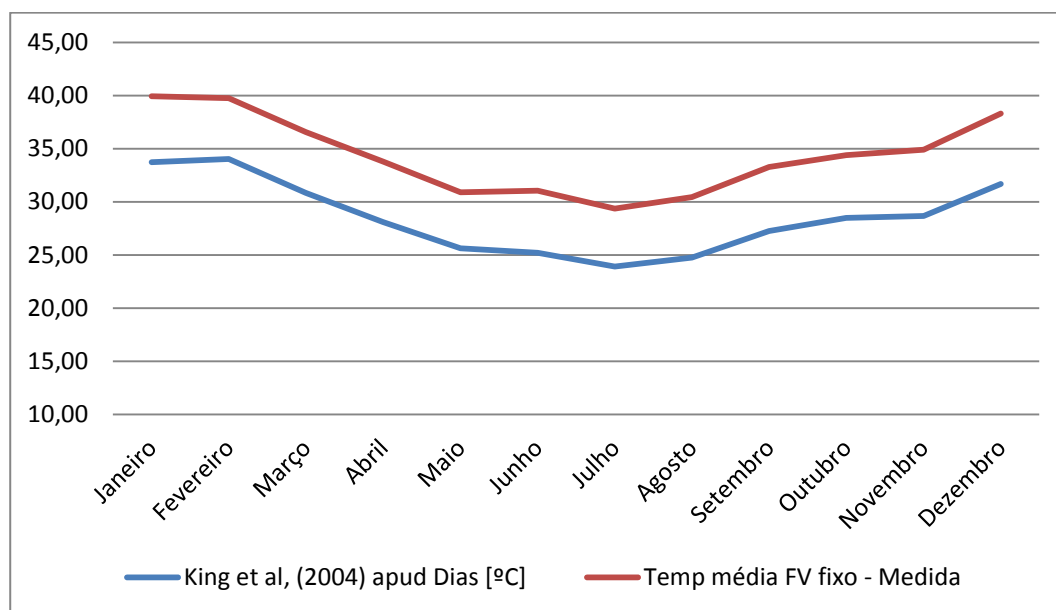


Figura 21 – Temperatura medida x calculada segundo King et al, (2004). (AUTOR< 2016)

A Figura 22 trás os resultados baseados na equação 8, onde a mesma é função somente da irradiação média mensal e da temperatura ambiente.

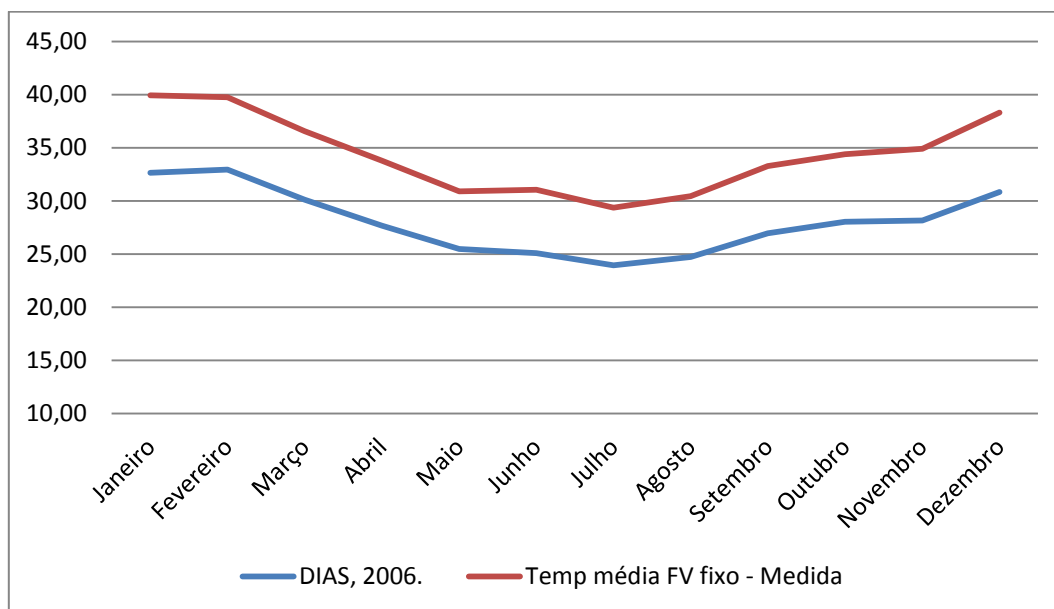


Figura 22 - Temperatura medida x calculada segundo Dias, 2006.



A Figura 23 apresenta os valores de temperatura de operação do módulo considerando-se a Equação 9 apresentada por TamizhMani et al, 2002 apud Beltrão.

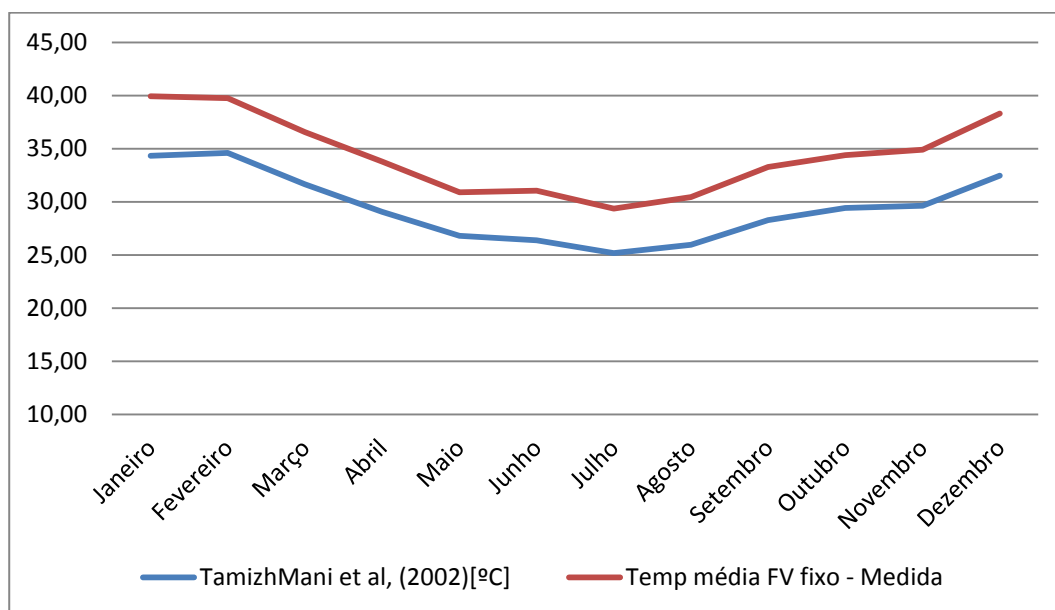


Figura 23 - Temperatura medida x calculada segundo TamizhMani et al, 2002 apud Beltrão.

Para finalizar os modelos matemáticos usados para estimar a temperatura de operação das células fotovoltaicas, a Figura 24 apresenta os resultados obtidos através do modelo proposto por Skoplaki et al, 2008.

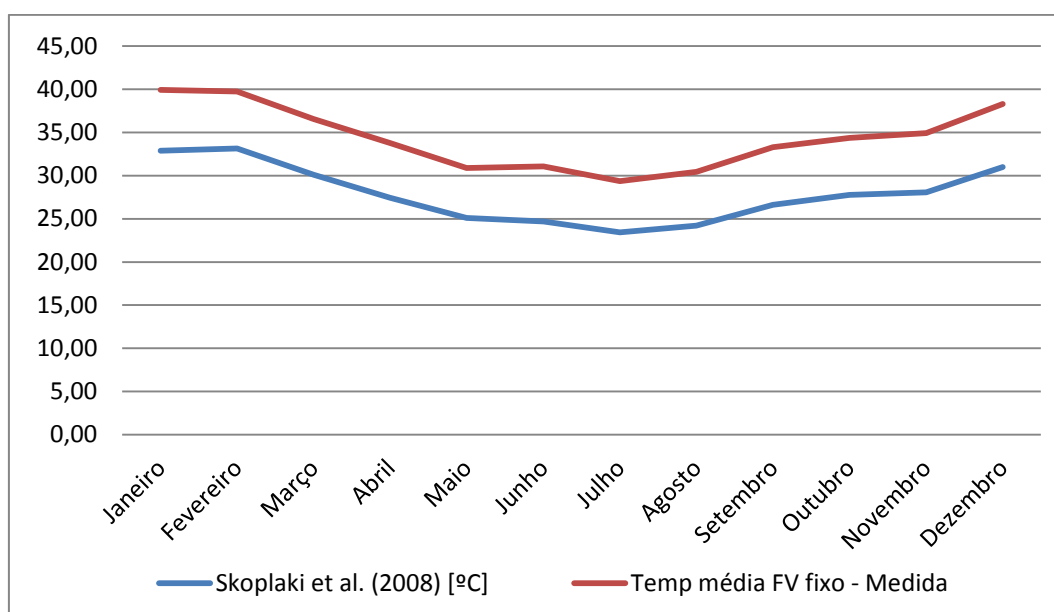
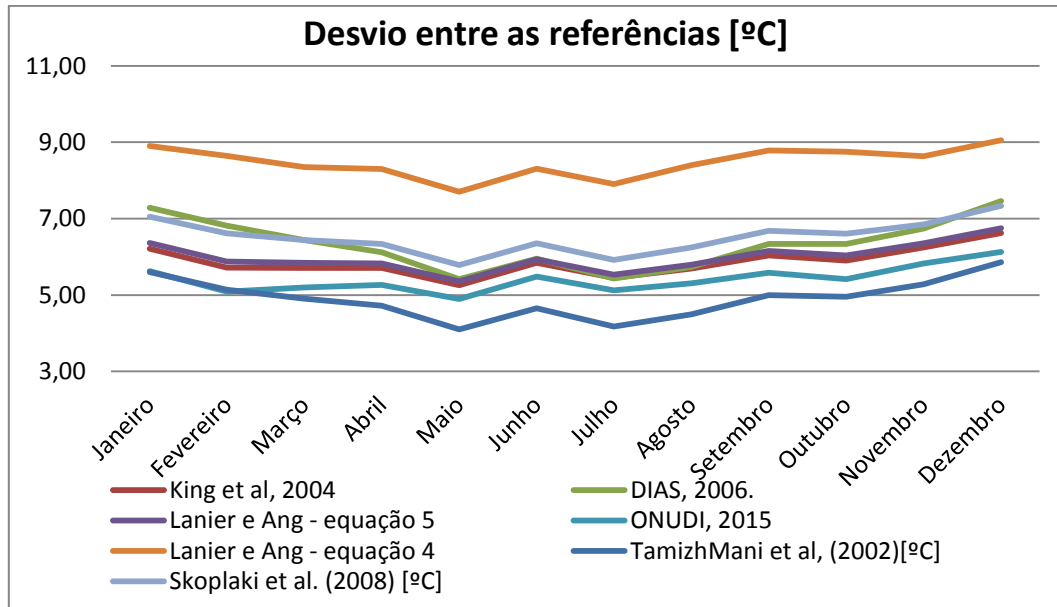


Figura 24 – Temperatura medida x calculada segundo Skoplaki et al, 2008 (AUTOR, 2016).

A Figura 25 apresenta um resumo dos resultados apresentados acima, de maneira a facilitar as comparações e também fazer uma análise global entre todas as referências utilizadas.



**Figura 25 – Diferença entre as temperaturas teóricas e medidas (AUTOR, 2016)**

Através da Figura 25, conclui-se que a equação mais adequada ao estudo de caso analisado neste trabalho foi a equação apresentada por TamizhMani et al, 2002. Embora exista uma diferença entre as outras equações estudadas, é inegável que elas possuem a mesma tendência de comportamento, existindo um gradiente característico em todas as equações que as deslocam alguns graus célsius abaixo da linha de medição real. De maneira geral, todas as equações utilizadas apresentaram uma boa alternativa para estimar para a temperatura de operação de módulos fotovoltaicos.

#### 4.2.1. Influência do vento na temperatura de operação

Os ventos se originam em decorrência da diferença de pressão atmosférica entre duas regiões. O vento é constitui um importante parâmetro para a geração fotovoltaica, pois relaciona-se diretamente com a temperatura de operação e possui papel fundamental nas transferências de calor entre o equipamento e o ambiente. Dentre as equações estudadas, duas delas são funções deste fenômeno natural. A Equação 7,

apresentada por King et al, 2004 e a Equação 9, apresentada segundo TamizhMani et al, 2002.

A Figura 26 apresenta uma comparação entre as temperaturas de operação calculadas através do modelo proposto por King et al, (2004) para diferentes velocidades do vento.

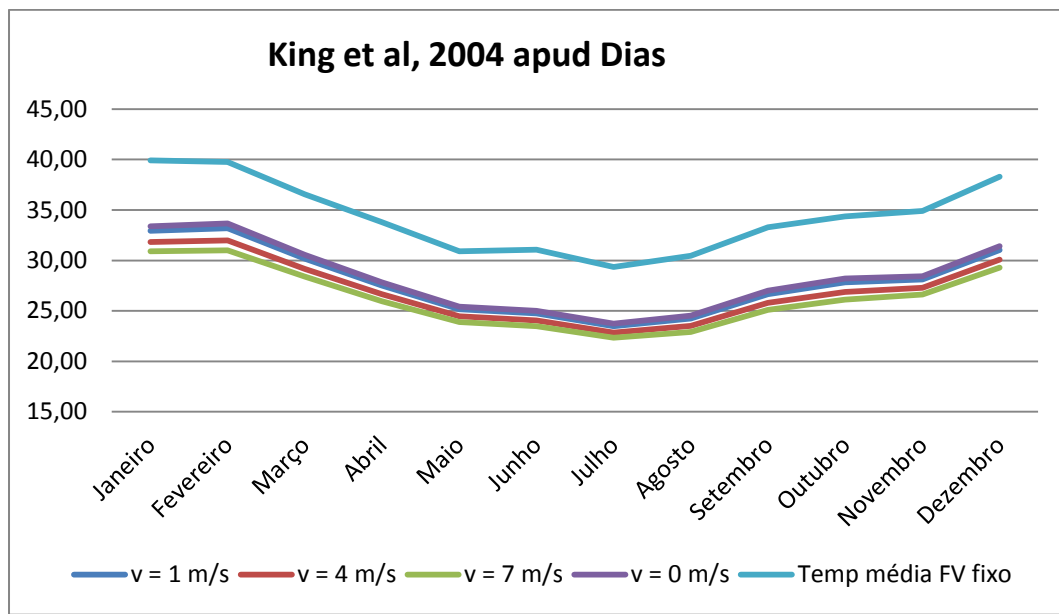
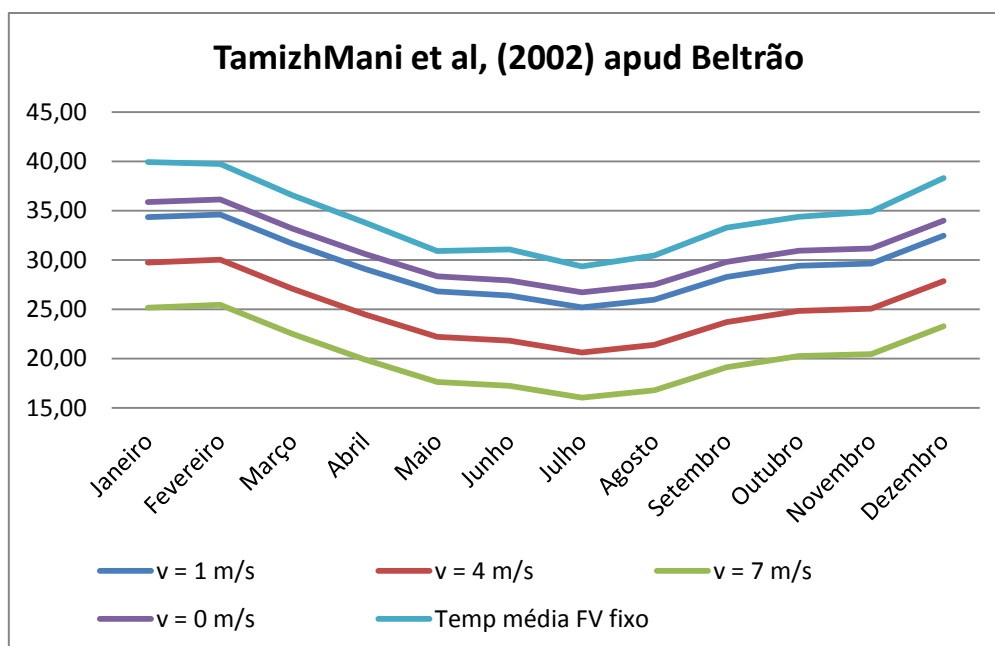


Figura 26 – Influência da velocidade do vento no modelo proposto por King et al, 2004 apud Dias.

Através da Figura 26 conclui-se que ambas ficaram abaixo das medições reais, porém quanto menor a intensidade do vento, mais próximo a linha se aproxima do valor medido. Também é possível perceber que a velocidade do vento, mesmo sendo parâmetro fundamental para a temperatura de operação dos módulos, neste modelo em específico causa pouca variação nos valores calculados.

O comparativo apresentado na Figura 27 assemelha-se ao apresentando na figura 29, porém utilizou-se o modelo proposto por TamizhMani et al, 2002 apud Beltrão. A velocidade do vento foi alterada de 0 m/s até 7 m/s.



**Figura 27 – Influência da velocidade do vento no modelo proposto por TamizhMani et al, 2002 apud Beltrão.**

Os resultados apresentados na Figura 27 mostram um comportamento diferente comparado ao modelo apresentado por King et al, 2004. As variações da velocidade do vento causam um deslocamento maior entre as linhas e embora ambas aumentem a distância para as linhas de temperaturas medidas com o aumento da velocidade do vento, este modelo é mais influenciado através da velocidade do deslocamento do ar.

### **4.3 Fator de capacidade e produtividade do arranjo**

O Fator de capacidade e a produtividade do arranjo também foram estudados neste trabalho. O Fator de Capacidade dos sistemas fotovoltaicos instalados no Brasil estão entre 13% e 18% para os novos sistemas. Para realizar o cálculo do Fator de capacidade do sistema utilizado na Casa Solar Eficiente utilizou-se a Equação 1. A figura 30, apresenta os resultados do fator de capacidade do sistema somente entre o período de janeiro à junho de 2014, pois os dados do segundo semestre apresentaram uma queda acentuada provavelmente devido a algum problema no módulo fotovoltaico ou mesmo no sistema de aquisição de dados de geração de energia da CSE. A Figura 28 apresenta o Fator de Capacidade calculado para o sistema fixo e para o sistema com rastreamento solar.

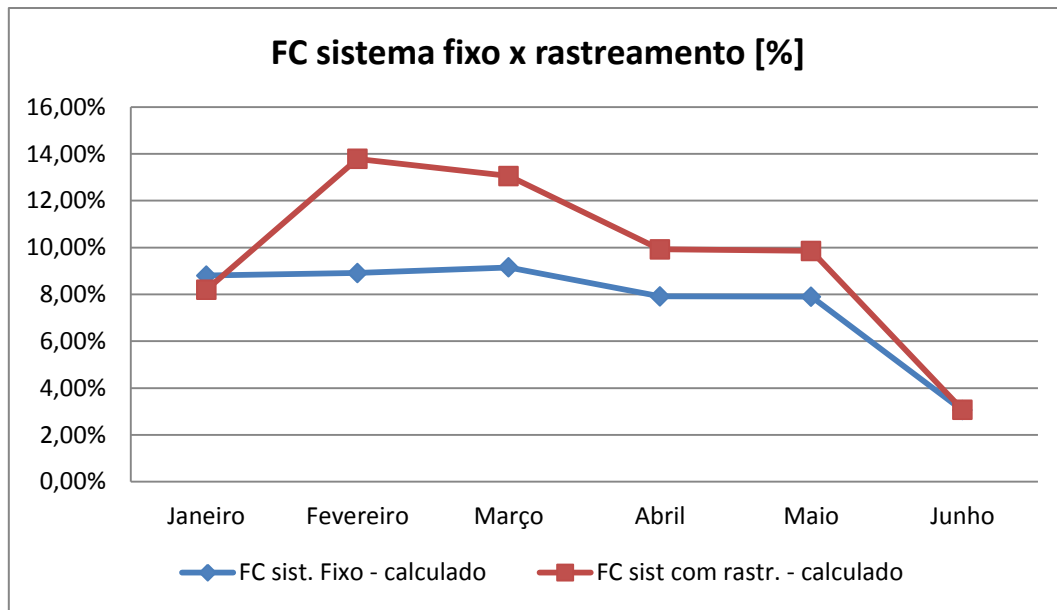
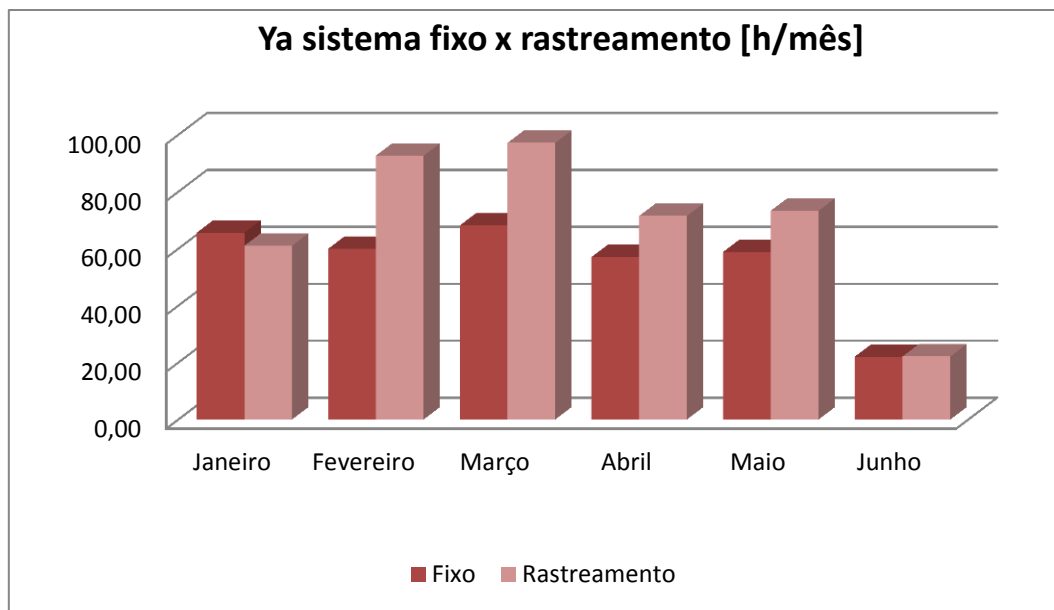


Figura 28 – Fator de Capacidade do sistema fixo e com rastreamento solar (AUTOR, 2016).

Pode-se observar que os valores encontrados estão abaixo do esperado, variando entre 8% a aproximadamente 14% durante os meses de fevereiro e março. Estes valores mostram que o módulo e o sistema estavam operando de maneira correta neste período, pois levando-se em consideração o tempo de operação do módulo (aprox. 19 anos) e a tecnologia utilizada na produção e montagem do sistema na época, os valores apresentam-se como aceitáveis.

A Figura 29 apresenta os valores obtidos através da Equação 2 referente à produtividade do arranjo, índice que representa a produção anual, em kWh para cada kWp instalado, ou seja, a relação entre a energia gerada de fato pelo arranjo com a potência nominal do gerador fotovoltaico.



**Figura 29 – Produtividade do arranjo fotovoltaico utilizado na CSE (AUTOR, 2016).**

Através da Figura 29 pode-se observar que a produtividade encontrada para os dois arranjos também foram bastante inferiores se comparados aos padrões atuais para este tipo de configuração. Foram apresentados os resultados entre janeiro e junho pelo mesmo motivo apresentado para o fator de capacidade.

De forma a auxiliar as conclusões apresentadas acima, com o auxílio do *software* SAM foi simulado um sistema semelhante ao arranjo fixo utilizado na CSE com potência nominal igual a 1,507 kW localizado na cidade do Rio de Janeiro - RJ. A Figura 30 apresenta a energia gerada pelo arranjo em corrente contínua (antes de passar pelo inversor) e também a energia gerada em corrente alternada (energia final do arranjo após a conversão de CC para CA). Através desses índices, será calculado o fator de capacidade mensal do sistema e também a produtividade do arranjo utilizando as mesmas equações 1 e 2 apresentadas.

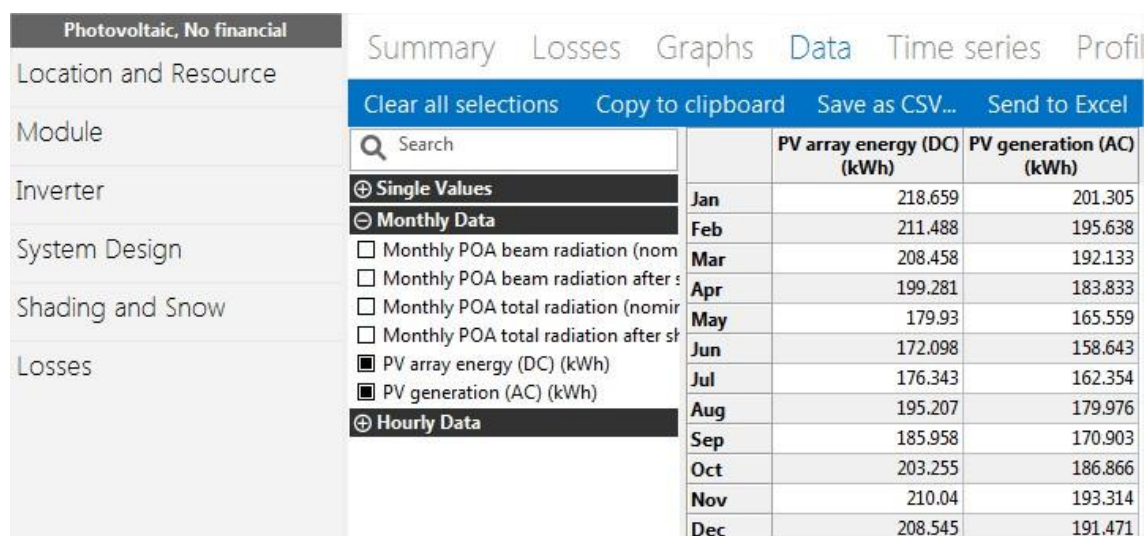


Figura 30 – Energia gerada pelo sistema fixo de 1,507 kW através da simulação (AUTOR, 2016).

A Figura 31 apresenta os resultados obtidos para os 3 sistemas em análise (Fixo, com rastreamento e a simulação). Através da Figura 31 pode-se concluir que o fator de capacidade do sistema realmente está abaixo do esperado e que, após o mês de Maio ocorreu alguma falha ou interferência no sistema, pois este com certeza não é o comportamento esperado.

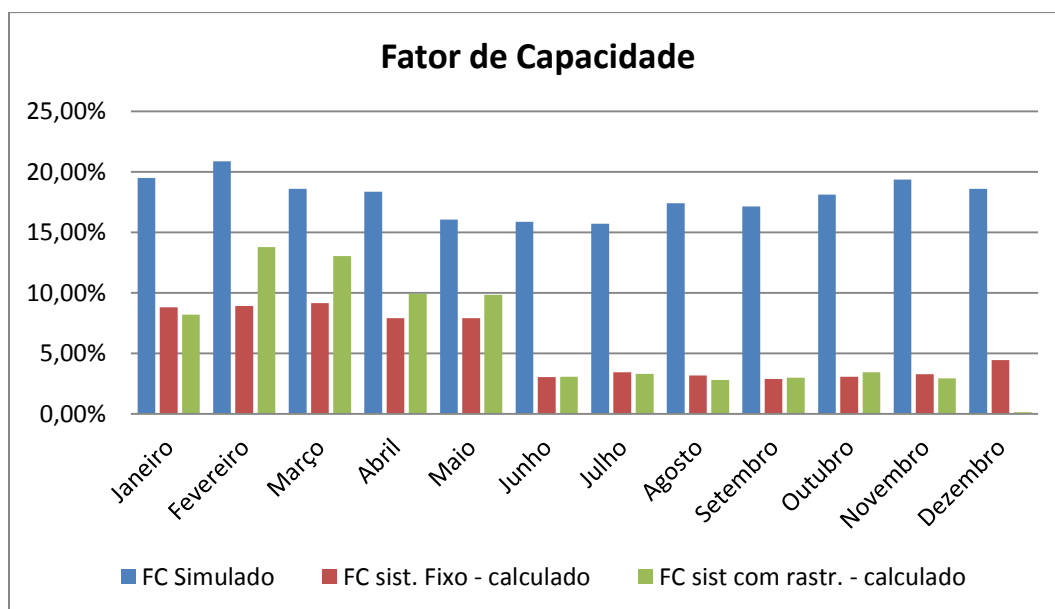


Figura 31 – Fator de capacidade dos 3 sistemas em estudo (AUTOR, 2016).

A Figura 32 apresenta novamente um comparativo entre a produtividade do arranjo simulada e a produtividade do arranjo calculada através dos registros do sistema

de aquisição de dados da CSE. Durante os meses iniciais, o sistema até operou de forma satisfatória, mesmo apresentando valores um pouco reduzidos.

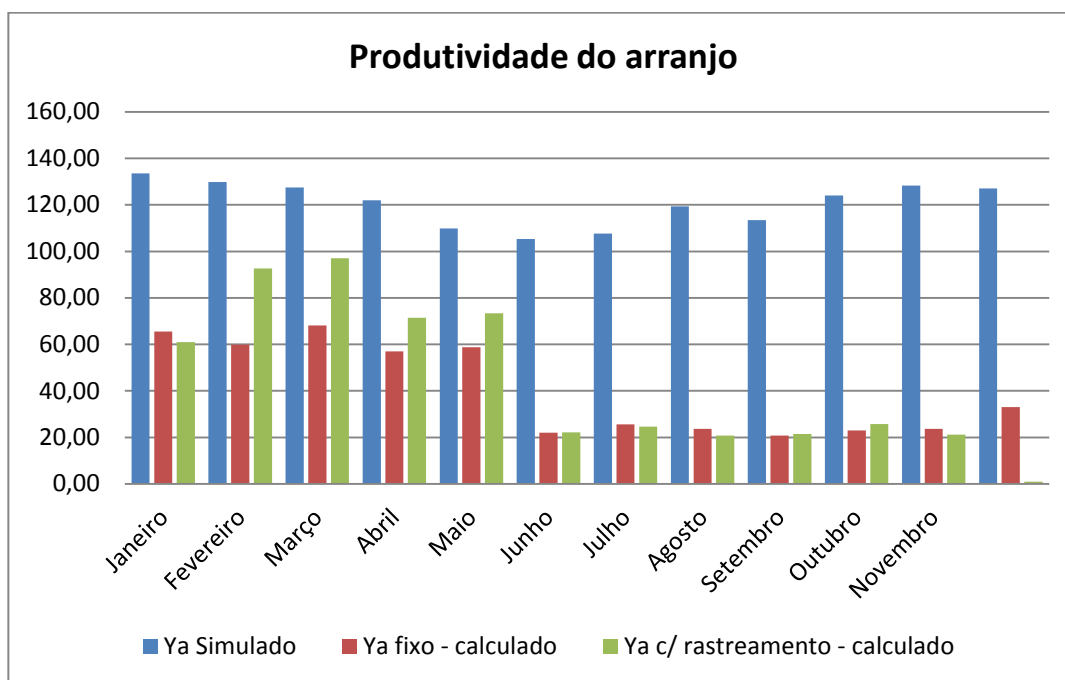


Figura 32 – Produtividade do arranjo dos 3 sistemas em análise (AUTOR, 2016).

Pode-se observar que a Figura 31 e a Figura 32 apresentam comportamentos bastante semelhantes, pois os índices Ya e FC estão relacionados às mesmas variáveis, por isso apresentam comportamentos similares, embora possuam significados bastante distintos.

Através da simulação, a média anual do fator de capacidade do sistema ficou em 17,8%, enquanto a média anual do sistema da CSE é de 8,54% levando em consideração somente os 5 primeiros meses do ano (que contém os maiores valores) e somente 5,51% considerando-se a média do fator de capacidade durante todo o ano de 2014.

## 5. CONCLUSÃO

Sistemas fotovoltaicos conectados à rede e adaptados à infraestrutura das construções civis tendem a se tornar cada vez mais frequentes no Brasil, e garantir a qualidade desses sistemas deve ser uma constante preocupação. Nesse sentido, este trabalho apresentou um procedimento de qualificação de sistemas fotovoltaicos com o objetivo de verificar seu funcionamento e a analisar os dados de geração capturados



através do sistema de aquisição de dados utilizado na Casa Solar Eficiente, referencia durante muitos anos para alunos e comunidade interessados em geração de eletricidade através de sistemas fotovoltaicos e de um aerogerador.

Para atingir o objetivo, o trabalho resumiu alguns aspectos relacionados à legislação aplicável aos sistemas fotovoltaicos no país e também algumas atualizações nas normas vigentes. Foram apresentados os principais parâmetros de desempenho utilizados para caracterizar sistemas fotovoltaicos e também as características do sistema energético implantado no projeto do estudo de caso. Propôs uma metodologia para calcular índices de mérito técnico e fórmulas teóricas utilizadas para estimar a temperatura de operação dos módulos fotovoltaicos.

O fator de capacidade e a produtividade do arranjo apresentaram resultados regulares no período de Janeiro à Maio, porém o restante dos meses com certeza não condizem com a realidade do sistema de geração estudado. Em contato com os responsáveis pela CSE, confirmou-se a informação de que durante este período de estudo houve várias paradas no sistema devido a falhas mecânicas nos módulos e também devido à substituição de alguns componentes de medição no SAD.

Para a análise de desempenho de um sistema em operação, o piranômetro utilizado no módulo fotovoltaico fixo mostrou-se eficaz, onde comparando com os resultados do software SAM, ofereceu boa precisão e resultados convergentes.

Conclui-se também que é muito importante estimar a temperatura em que os módulos irão operar na maioria do tempo, adequando assim o local de instalação e interferindo até na escolha do módulo a ser adquirido de acordo com a temperatura máxima de operação do mesmo, do coeficiente de dilatação e do coeficiente térmico do módulo fotovoltaico, visto que a eficiência e a vida útil do mesma pode ser diretamente afetada. De acordo com os modelos estudados, todos apresentaram erros comparados à medição real feita no módulo, porém também apresentaram o mesmo comportamento durante todo o ano, apenas com deslocamentos de alguns °C diferentes entre si. Para o estudo de caso em análise, o modelo que mais se aproximou da realidade foi o apresentado por TamizhMani (2002), onde a mesma apresentou uma diferença média de 4,9°C.

Embora a viabilidade da microgeração fotovoltaica dependa de diversas condições como, do investimento necessário, o desempenho do sistema, dos níveis de irradiação solar e das condições vigentes nas tarifas de energia elétrica para o grupo em questão, segundo a Abinee, no cenário padrão já ocorre plena viabilidade da

microgeração em todas as capitais brasileiras e em um cenário alternativos com a evolução de tarifas abaixo da inflação, também há viabilidade na maioria dos casos.

Por fim, em linhas gerais pode-se considerar a microgeração fotovoltaica como uma alternativa interessante às fontes tradicionais no sistema elétrico brasileiro. Apesar de existirem limitações devidas, principalmente à sua intermitência, seu custo de operação é bastante baixo e o recurso solar pode ser considerado como infinito. Além disso, no atual momento em que apresenta-se o setor elétrico brasileiro, a microgeração mostra-se uma modalidade com muito potencial e com retorno financeiro atrativo para os consumidores de energia elétrica.

## **ANALYSIS OF MATHEMATICAL MODELS OF TEMPERATURE OF PHOTOVOLTAIC MODULES AND ENERGETIC EVALUATION BASED ON DATA FROM THE CASA SOLAR EFICIENTE**

### **ABSTRACT**

The intense search for modernity and energy production has caused a lot of changes in our behavior and especially the environment. In addition, a great development of technologies named renewable have been seeing in our daily lives such as photovoltaic systems and wind plants, for example. The Photovoltaic technology, subject of this term paper, is not a recent discovery; however studies have been intensifying in the last decades, which helped decreasing photovoltaic modules manufacturing cost and its consequent insertion in the world market. This study is aimed at analyzing Energetic data available in the Data Acquisition System (SAD) from the Casa Solar Eficiente – RJ, and compares them to mathematical models for the operating temperature forecast of the photovoltaic arrays that feed the residence through calculations and simulations with support made by software to analyze their performance during the year 2014. The results show that the system is producing little lower than expected, probably due to aging of the operative modules for nearly 19 years and possible errors in the Data Acquisition System. It also noted that all the mathematical models used to estimate the operating temperature of the modules in this research follow the same trend behavior recorded through the instantaneous temperature measurements in the module, even though with an offset just below the point in question of the case study.

**Keywords:** Solar Energy, Photovoltaic modules, Casa Solar Eficiente.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Marcelo Pinho. **Qualificação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede**. 2012. Monografia (Especialização) – Pós Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

ABSOLAR. **Potencial da energia solar ainda é subutilizado no país**. Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica, São Paulo, 2016. Disponível em: <<http://www.absolar.org.br/noticia/noticias-externas/potencial-da-energia-solar-ainda-e-subutilizado-no-pais.html>>. Acesso em: 03 maio 2016.

BARATA, Luiz Eduardo. **PANORAMA SETORIAL: Assembleia Geral da COGEN. Perspectivas da geração distribuída no sistema elétrico brasileiro**. São Paulo, 2016.

BRANKER, K; PATHAK, M.J.M; PEARCE,J.M. A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 4470–4482, 2011.

BRASIL ENERGIA. **Energia solar obrigatória em prédios de São Francisco**. Centro Brasileiro de informação de Eficiência Energética, 09 mai. 2016. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?ViewID=%7BF5EAADD6-CCB0-4E29-A0C4-482D3D66BB65%7D&params=itemID=%7B216349A9-65C1-476C-AAC8-5493A9612510%7D;&UIPartUID=%7BD90F22DB-05D4-4644-A8F2-FAD4803C8898%7D>>. Acesso em 09/05/2016.

BRITO, Osório de. **A hora e a vez da geração distribuída**. CanalEnergia, Rio de janeiro, 13 mai. 2016. Disponível em: <<http://www.canalenergia.com.br/zpublisher/materias/imprimir.asp?id=111872>>. Acesso em 17/05/2016.

CEPEL. **As energias solar e eólica no Brasil**. 2013. Disponível em: <<http://cresesb.cepel.br/download/casasolar/casasolar2013.pdf>>. Acesso em: 09 dez. 2015.

CEPEL; CRESESB. **Visita Virtual à Casa Solar**. 2014. Disponível em: <[http://cresesb.cepel.br/index.php?section=com\\_content&cid=visita\\_virtual](http://cresesb.cepel.br/index.php?section=com_content&cid=visita_virtual)>. Acesso em: 17 set. 2015.

DIAS, João Batista. **Instalação fotovoltaica conectada a rede: Estudo experimental para a otimização do fator de dimensionamento**. Tese (Doutorado) – Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

FEITOSA, Arnaldo. Energias Renováveis: **O imenso potencial brasileiro**. Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética, 13 mar. 2016. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?ViewID=%7BF5EAADD6-CCB0-4E29-A0C4-482D3D66BB65%7D&params=itemID=%7BC37AD435-DA43-498A-B7B2-5C621B8A2509%7D;&UIPartUID=%7BD90F22DB-05D4-4644-A8F2-FAD4803C8898%7D>>. Acesso em 17/03/2016.

FREIRE, Wagner. **Roraima isenta ICMS para geração distribuída no Estado**. CanalEnergia, São Paulo, 10 mai. 2016. Disponível em: <<http://www.canalenergia.com.br/zpublisher/materias/Newsletter.asp?id=111797>>. Acesso em 11/05/2016.

FUSANO, Renato Hideo. **Análise dos índices de mérito do sistema fotovoltaico conectado à rede do escritório verde da UTFPR**. 2013. Tese (Doutorado) - Curso de Curso de Engenharia Industrial Elétrica/eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

GALDINO, Marco Antonio. Análise de custos históricos de sistemas fotovoltaicos no Brasil. **IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferencia Latino-americana da ISES**, São Paulo, Setembro, 2012.

MACHADO, Karla Suzane Van-dall; CORREA, Nicoli. **Análise do desempenho de sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica em Curitiba**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

MARTINS, Fernando Ramos et al. **Mapas de irradiação solar para o Brasil – Resultados do Projeto SWERA**. Anal, XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, 2005.

METEONORM, 2012. Disponível em:

<<http://meteonorm.com/download/maps/>>. Acesso em: 21 Março 2012.

MIRANDA, Raul Figueiredo Carvalho. **Análise da inserção de geração distribuída de energia solar fotovoltaica no setor residencial brasileiro**. 2013. Dissertação - Curso de Planejamento Estratégico, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

MME. **Brasil Lança Programa de Geração Distribuída Com Destaque Para Energia Solar**. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset\\_publisher/32hLrOzMKwWb/content/programa-de-geracao-distribuida-preve-movimentar-r-100-bi-em-investimentos-ate-2030](http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/programa-de-geracao-distribuida-preve-movimentar-r-100-bi-em-investimentos-ate-2030)>. Acesso em: 07 maio 2016.

NAKABAYASHI, Renny. **Microgeração fotovoltaica no Brasil**: Viabilidade econômica. 2014. 1 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

Soteris Kalogirou, *Solar Energy Engineering Processes and Systems*, Second Edition, Elsevier.

NASCIMENTO, Cássio Araújo. **Princípio de funcionamento da célula fotovoltaica**. 2004. Monografia (Especialização) - Curso de Fontes Alternativas de Energia, Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, 2004.

NOTA TÉCNICA. **Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil**. Ministério de Minas e Energia e Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, 2014.

NOTA TÉCNICA DEA 19/14. **Inserção da Geração Fotovoltaica Distribuída no Brasil – Condicionantes e Impactos**. Ministério de Minas e Energia e Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, 2014.

NREL. **System Advisor Model**. Disponível em: <<https://sam.nrel.gov/>>. Acesso em: 08 maio 2016.

ONUDI. Energia Solar Fotovoltaica. **Programa de Capacitação em Energias Renováveis**: Observatório de Energias Renováveis Para América Latina e Caribe, 2015.

PALZ, P. C., **Energia solar e fontes alternativas**. Hemus: São Paulo/SP. 1995.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio (Org.). **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. CEPEL – CRESESB. Rio de Janeiro, 2014.

POLITO, Rodrigo. **Segmento de geração solar vai investir R\$ 12,5 bilhões até 2018**. CanalEnergia, São Paulo, 27 abr. 2016. Disponível em:<[http://canalenergia.com.br/zpublisher/materias/Clipping\\_imprimir.asp?id=185103&prlink=1](http://canalenergia.com.br/zpublisher/materias/Clipping_imprimir.asp?id=185103&prlink=1)

RIBEIRO, Bruno. **A energia solar já é uma realidade no Brasil**. Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética, 11 mar. 2016. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?ViewID=%7B8D1AC2E8-F790-4B7E-8DDD-CAF4CDD2BC34%7D&params=itemID=%7BBA352101-7B94-4F52-942B-55327668D604%7D;&UIPartUID=%7BD90F22DB-05D4-4644-A8F2-FAD4803C8898%7D>>. Acesso em 13/03/2016.

SKOPLAKI, E.; PALYVOS, J. A. Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations. **Renewable Energy**, v. 34, p. 23 - 29, Janeiro, 2009.

SOARES, Guilherme Fleury Wanderley et al. **Comparação de custos entre sistemas fotovoltaicos individuais e minicentrais fotovoltaicas para eletrificação rural**. III Congresso Brasileiro de Energia Solar, Belém, setembro, 2010.

SOUZA, Ronilson di. **Introdução a sistemas de energia solar fotovoltaica**. Blue Sol Energia Solar. Ribeirão Preto, 2015.

TRIBUNA FEIRENSE. **Microgeração de energia solar tem isenção de ICMS**. Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética, 11 mar. 2016. Disponível em:

<<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?ViewID=%7BF5EAADD6-CCB0-4E29-A0C4-482D3D66BB65%7D&params=itemID=%7B21868A42-0D37-4970-9901-0FFCB51D36AC%7D;&UIPartUID=%7BD90F22DB-05D4-4644-A8F2-FAD4803C8898%7D>>. Acesso em 13/03/2016.

VERA, Luis Horacio; KRENZINGER, Arno. Análise do desempenho de sistemas fotovoltaicos autônomos através de índices de mérito. **Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente**, Argentina, v. 15, 2011

## AGRADECIMENTOS

À Deus, minha segurança e inspiração, que me proporcionou saúde e me guiou durante os vários caminhos que percorri (6 cidades) até chegar a finalização deste trabalho de conclusão de curso.

Agradeço de maneira especial aos meus pais, Daniel Novak e Beatriz Márcia Vercka Novak e também as minhas irmãs, Nádia e Marilete, pelo apoio incondicional, pelos conselhos e puxões de orelha que serviram como fonte de inspiração para tudo que faço. Amo vocês.

À Universidade Federal de Santa Catarina que foi uma segunda casa durante esses 5 anos de graduação e também à todos os funcionários e professores que dedicaram seu tempo e paciência para proporcionar um ambiente amigável e muitos ensinamentos. Um agradecimento pessoal ao meu professor orientador, prof. Giuliano Arns Rampinelli, pela paciência, pelos conhecimentos e pela atenção disponibilizada durante toda a elaboração deste trabalho.

Um agradecimento também à todos os jogadores e integrantes da comissão técnica da equipe amadora de futebol VimMoendo que durante todo este tempo que estive em Araranguá me acolheram de braços abertos e cuidaram de mim como uma verdadeira família. A todos vocês, meu muito obrigado!